

**APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MOHID PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE
TRANSPORTE DE LA CIÉNAGA MALLORQUÍN**

CÉSAR TORRES MARCHENA

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA 2015**

**APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MOHID PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE
TRANSPORTE DE LA CIÉNAGA MALLORQUÍN**

P R E S E N T A :

CÉSAR TORRES MARCHENA

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Ambiental

ASESOR

Dr. Franklin M. Torres Bejarano



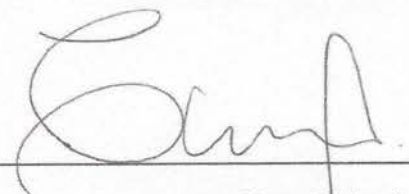
**UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
INGENIERÍA AMBIENTAL**

Nota de Aceptación

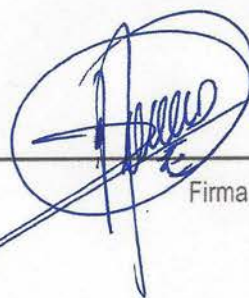
4.8

Natalia Salazar

Firma del Presidente del Jurado



Firma del Jurado



Firma del Jurado

Barranquilla, Octubre de 2015



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO
UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

ACTA N°: 12
DE SUSTENTACIÓN DE PROYECTO DE GRADO

En la Universidad de la Costa, CUC, siendo las 10:00 a.m. horas, del día 18 de septiembre del año 2015 en cumplimiento de lo señalado en el Acuerdo 237, se presentó el(los) estudiante(s):

César Torres Marchena

Con el fin de sustentar el proyecto de grado titulado:

APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MOHID PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE TRANSPORTE DE LA CIÉNAGA MALLORQUÍN, COLOMBIA.

Firma del(los)
interesado(s)

Ante el comité evaluador, integrado por:

Asesor: Franklin Torres Bejarano.

Evaluador: Israel Enrique Herrera

Evaluador: Camilo Osorio

Concluida la presentación y la defensa oral, el comité evaluador dictaminó otorgarle una calificación de* 4.8

El Director de Programa le hizo saber al sustentante el resultado obtenido

Nombre de Asesor

Nombre de evaluador

Nombre de evaluador

Director de Programa

*Opciones de calificación: cinco, cuatro, tres, no aprobada, incompleto

AGRADECIMIENTOS

No me había dado cuenta y me resulta curioso que los agradecimientos sea lo primero que se muestre de este trabajo de investigación, sin embargo es lo último que he redactado del mismo. En todo caso, haciendo un breve retroceso me doy cuenta lo afortunado que he sido de poder contar con personas que de forma incondicional y desinteresada, han estado en cada momento de este proceso de mi tesis, en los buenos y en los no tan buenos, a todos ellos infinitas gracias. Confío y Dios mediante que este trabajo de grado del cual he aprendido tanto y me siento tan orgulloso, sea la plataforma de despegue para futuros trabajos en lo académico y profesional.

En primera instancia le doy gracias a Dios por ayudarme en eso que más me cuesta, que es mantenerme en una línea de trabajo y no dejarme llevar todo el tiempo por mi natural dispersión mental, además en mantener la calma y paciencia para saber esperar los momentos adecuados para actuar.

A mis padres

Por su apoyo incondicional, sus consejos y palabras de motivación para culminar la primera etapa de mi vida profesional. Por esos pequeños grandes detalles que han marcado mi vida. Los Amo mis viejos queridos.

A mis hermanos,

Por sus consejos, colaboración incondicional, por ser ejemplos a seguir y constantemente motivarme a ser mejor. Son parte fundamental de mi vida, cada uno es un grande sin medida.

A mis sobrinos y cuñados

Por ser siempre fuente de buenas energías y alegrías.

A mi Asesor Externo

Ingeniero Luis Fernandes de Action Modulers por su invaluable ayuda, su asesoría fue fundamental para la resolución de incógnitas durante este trabajo de investigación.

A mis amigos

Los cuales saben a la perfección quienes son, por su amistad, apoyo y ánimos en cada momento para culminar esta etapa.

A mi asesor

Al Doctor Franklin Torres Bejarano, que más que un asesor ha sido un amigo, un ejemplo a seguir y mi “padrino” en esta etapa de mi vida universitaria, por impulsarme y exigirme a ser mejor ingeniero y persona, en sí, por estar siempre disponible a transmitirme sus conocimientos.

RESUMEN

El conocimiento sobre el funcionamiento de los sistemas costeros está limitado por la escasa disponibilidad de observaciones e investigaciones en el campo de la hidrodinámica. En este estudio se muestra cómo los modelos numéricos pueden contribuir a generar el conocimiento acerca de los procesos costeros, con poca información local y a un costo relativamente bajo. Esta investigación representa un paso hacia la comprensión y entendimiento más completa de los procesos hidrodinámicos y de transporte que se dan en la Ciénaga Mallorquín.

En el presente trabajo se estudió los procesos de hidrodinámica y transporte de la Ciénaga Mallorquín, mediante la aplicación del modelo numérico bidimensional (2D), MOHID Studio, el cual es una interfaz de usuario del sistema de modelación MOHID. El modelo MOHID es un sistema numérico para la modelación tridimensional de ecosistemas acuáticos, resuelve las ecuaciones primitivas incompresibles, suponiendo equilibrio hidrostático y empleando la aproximación de Boussinesq. En el estudio se analizan los comportamientos hidrodinámicos y de transporte de la Ciénaga Mallorquín, para los dos escenarios de simulación, época de secas y de lluvias. Por medio del análisis de las corrientes del agua y el transporte de la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto presentes en la Ciénaga Mallorquín.

El sistema fue forzado por medio de la implementación de las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, los aportes de aguas continentales (AAC) y la imposición de la marea en el límite abierto oceánico utilizando el modelo integrado de mareas FES (solución de elementos finitos) llamado FES2004. En el escenario de secas se consideraron que las fronteras del sistema estaban cerradas y en la época de lluvias se estableció una condición de frontera abierta, permitiendo al modelo la entrada de la marea a la Ciénaga Mallorquín.

El estudio utilizó todos los datos disponibles a nivel local y puestos a disposición a través de las plataformas oceanográficas como la del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrológicas (CIOH) y la del Instituto de Hidrología,

Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). En ausencia de datos de campo, la verificación de los resultados del modelo fue apoyado de acuerdo con los procesos físicos conocidos del hidrosistema. Los datos registrados del nivel del mar por el CIOH para las fechas del mes de Octubre del año 2013, fueron utilizados para la evaluación cualitativa de los niveles del agua registrados por el modelo hidrodinámico 2D. Estos datos en conjunto con los establecidos por el FES 2004 integrado al modelo, permitieron la caracterización de los principales componentes de la marea, a partir de esto se estableció que la marea que se da en la zona de estudio es de tipo mixto con predominio diurno.

Como resultado del estudio, para el escenario de época de secas la forzante más importante e influyente es el viento. Los AAC debido a su caudal aportante no son apreciables e influyentes en la circulación de la ciénaga. En la ciénaga se presentan bajas velocidades en gran parte de la misma, las mayores velocidades se dan hacia la zona comprendida por la desembocadura del arroyo León y sobre las orillas de la barra de arena que separa la Ciénaga Mallorquín del mar Caribe. El transporte de la salinidad, la temperatura y el oxígeno disuelto están dominados por el transporte difusivo debido a las bajas velocidades que se dan en la ciénaga en este escenario de simulación.

En el escenario de época de lluvias, se considera además del viento y los AAC, a la marea como forzante del sistema lagunar, con lo que se obtiene que el viento sigue siendo importante para la circulación de las masas de agua en la ciénaga, la marea presenta gran influencia en la entrada o “boca” que comunica a la ciénaga con el mar y en las zonas próximas a la misma, dándose las mayores velocidades del lagunar en dicha zona. Sin embargo se muestra que la marea pierde influencia en la circulación de la ciénaga en el resto de la misma, presentando velocidades muy bajas hacia las zonas que comprenden el centro de la ciénaga hacia la parte colindante con las comunidades. El Arroyo León para esta época del año presenta un mayor caudal aportante, por lo que transporta la escorrentía recogida a lo largo de su trayecto por causa de la época invernal.

La salinidad, temperatura y el OD en la ciénaga Mallorquín, está dominada por el transporte difusivo, sin embargo los niveles de la primera están sujetos a la conexión o no con el mar Caribe, por lo que acepta que la marea aporta altos niveles de salinidad al cuerpo de agua.

Palabras claves: Modelación hidrodinámica, transporte advectivo, transporte difusivo.

ABSTRACT

Knowledge about the coastal systems functions is limited by observations scarcity and researches in the hydrodynamics field. This study shows how numerical models can help to generate knowledge about coastal processes with little local information and at relatively low cost. This research is a step to the comprehension and the hydrodynamic and transport processes understanding that occur in the Mallorquín lagoon.

In this work the hydrodynamic and transport processes of Mallorquín lagoon was studied by applying the modeling system MOHID. The MOHID model is a numerical system for three-dimensional aquatic ecosystems modeling, solving the incompressible primitive equations, assuming hydrostatic equilibrium and using the Boussinesq approximation. In this study, the hydrodynamic and transport behavior of Mallorquín lagoon was analyzed for two simulation scenarios, dry and rainy season, through analysis of water currents and transport of salinity, temperature and dissolved oxygen.

The system was forced using the meteorological parameters in the study area, the contribution of inland waters and the tide variation using the integrated model of tides FES (finite element solution) called FES2004. For dry scenario it was considered that the system boundaries were closed and for rainy season an open boundary was established, allowing the interaction between Caribbean Sea and Mallorquín lagoon.

The study used all data available locally and made available through oceanographic platforms such as the Centre for Oceanographic and Hydrological Research (CIOH) and the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia (IDEAM). In the absence of field data, the verification of the model results was supported according to known physical processes hydrosystem. The sea levels registered by CIOH for October 2013, were used for the qualitative evaluation of water levels registered by the 2D hydrodynamic model. These data together with those established by the FES 2004 integrated model, allowed the characterization of the tide main components, since it was established that the tide that occurs in the study area is of mixed type daytime predominance.

As a result of the study, for the dry season scenario the most important and influential forcing is the wind. The contributions of continental waters due to his flow are not significant and influential in the water movement inside the Mallorquín lagoon. Into the lagoon, low velocities are presented largely the same, the higher velocities are given in the zone close to the mouth of the "Arroyo León and on the edge of the sand bar that separates the Caribbean Sea of the Mallorquín Lagoon. The transport of salinity, temperature and dissolved oxygen are dominated by diffusive transport because of the low velocities that occur in the lagoon in this simulation scenario.

On the rain scenario season is also considered the wind and the contribution of continental waters, the tide as forcing of the lagoon system, it was obtained that the wind is still important for the movement of water bodies in the lagoon, the tide has great influence on the input or "mouth" that connects the lagoon with the sea and the areas close to it, giving the highest velocities in that area of the lagoon. However it is shown that the tide lost influence in the circulation of the lagoon in the rest of it, presenting very low velocities to areas that comprise the center of the lagoon into the adjoining part with communities. The "Arroyo León" for this time of year has a greater contributor flow, so that carries runoff collection along its path because of the winter.

Salinity, temperature and DO in the Mallorquín lagoon is dominated by diffusive transport, however the levels of the first subject to the connection or not with the Caribbean Sea, which agree that the tide brings high salinity the body of water.

Keywords: hydrodynamic modeling, advective transport, diffusive transport

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. Objetivo General	18
1.2.2. Objetivos Específicos.....	18
2. Consideraciones generales sobre modelación hidrodinámica	20
2.1. Introducción	20
2.2. Procesos de transporte	21
2.2.1. Fenómenos de transporte.....	21
2.2.1.1. Advección	21
2.2.1.2. Dispersión.....	21
2.2.2. Ecuación de Advección – Difusión.....	22
2.3. Modelación hidrodinámica	23
2.3.1. Estado del arte	25
2.4. Sobre los modelos de simulación hidrodinámica.....	26
2.5. Métodos de solución de las mallas numéricas.....	27
3. Contextualización sobre lagunas costeras y estuarinas	30
3.1. Introducción	30
3.2. Procesos físicos que influyen en la hidrodinámica de los sistemas costeros	32
3.2.1. Efectos de la marea	33
3.2.1.1. Clasificación de las mareas.....	33
3.2.1.2. Componentes armónicos de las mareas	34
3.2.2. Efectos del viento.....	35
3.2.3. Efectos de densidad	35
3.2.4. Aportes de aguas continentales.....	36
3.2.5. Turbulencia.....	36
3.3. Dinámica en lagunas costeras	38
3.1. Situación actual de las lagunas costeras en Colombia.....	38

4. Modelo hidrodinámico MOHID Studio.....	40
4.1. Introducción	40
4.2. MOHID Studio	41
4.3. Sistema de modelación MOHID	41
4.3.1. MOHID Water	42
4.3.2. Módulo Hidrodinámico MOHID	43
4.3.3. Módulo de Transporte MOHID	45
4.4. Viscosidad y difusividad turbulenta	47
4.5. Condiciones de frontera.....	48
5. Descripción de la zona de estudio: La Ciénaga Mallorquín.....	50
5.1. Introducción	50
5.2. Meteorología de la Ciénaga Mallorquín.....	51
5.3. Aportes de aguas continentales.....	55
5.4. Hidrografía de la Ciénaga Mallorquín	56
5.5. Condiciones hidrodinámicas del mar adyacente a la Ciénaga Mallorquín	57
5.5.1. Caracterización de la marea	59
5.5.2. Oleaje	60
5.5.3. Corrientes	61
5.6. Circulación de la salinidad y temperatura.....	62
5.7. Conexión Ciénaga Mallorquín – Mar Caribe	66
5.8. Clasificación costera de la Ciénaga Mallorquín.....	69
5.9. Campaña de medición y muestreo	71
6. Adaptación del modelo a la zona de estudio	74
6.1. Condiciones de frontera e iniciales	74
6.1.1. Aportes de aguas continentales.....	77
6.2. Malla numérica.....	77
6.3. Simulaciones 2D	78
6.4. Forzantes	79
7. Aplicación del modelo a la zona de estudio y resultados.....	83
7.1. Introducción	83
7.2. Simulaciones hidrodinámicas y de transporte de la Ciénaga Mallorquín para época de secas	84

7.2.1.	Calibración modelo de transporte época de secas	84
7.2.2.	Simulación hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín para época de secas	86
7.2.3.	Simulación hidrodinámica de los aportes de aguas continentales	88
7.2.4.	Simulación hidrodinámica del viento como única forzante	89
7.2.5.	Simulación del transporte y comportamiento de la salinidad, temperatura y OD ...	91
7.2.5.1.	Simulación de la salinidad	91
7.2.5.2.	Simulación de la temperatura	93
7.2.5.3.	Simulación del Oxígeno disuelto	94
7.3.	Simulaciones hidrodinámica y de transporte de la Ciénaga Mallorquín para época de lluvia	96
7.3.1.	Calibración hidrodinámica época de lluvias	96
7.3.2.	Simulación hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín para época de lluvias	98
7.3.3.	Simulación hidrodinámica de la marea	100
7.3.4.	Simulación hidrodinámica de los AAC	102
7.3.5.	Simulación hidrodinámica del viento	103
7.3.6.	Simulación del transporte y comportamiento de la Salinidad, temperatura y OD.	105
7.3.6.1.	Simulación de la salinidad	105
7.3.6.2.	Simulación de la temperatura	106
7.3.6.3.	Simulación del oxígeno disuelto	108
7.1.	Comparación de resultados entre la época de lluvias y secas	110
7.1.1.	Simulación hidrodinámica: Viento época de secas vs Viento época de lluvias	110
7.1.2.	Simulación hidrodinámica: AAC época de secas vs AAC época de lluvias	111
7.2.	Escenario hipotético	112
8.	Conclusiones y recomendaciones	115
8.1.	Recomendaciones	117
8.1.1.	Disponibilidad de datos	117
8.1.2.	Mejoramiento del hidrosistema	117
8.1.3.	Ciénaga Mallorquín – Actualidad y futuro	118

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de la morfología típica de una laguna costera y un estuario. Fuente: Barrios y Ramírez, 2012.....	32
Figura 2. El periodo de las mareas semidiurnas es de 12 h 25 min, debido al movimiento de rotación de la Luna alrededor de la Tierra. X es un punto sobre la superficie de la Tierra. Tarda 24 h 50 min en volver a estar alineado con la Luna (IDEAM, 2014).	34
Figura 3. Esquema de MOHID Water: principales módulos involucrados. Elaboración adaptada. Fuente: Barreto <i>et al</i> (2009).	43
Figura 4. Zona de estudio: Ciénaga Mallorquín (11°05'N - 75°52'W)	51
Figura 5. Dirección del Viento Promedio Anual. Fuente: CRA con información de Universidad del Norte, 2005	53
Figura 6. Promedio multianual de precipitación. Fuente: Elaboración propia con datos del CIOH (2010)	54
Figura 7. Temperatura Media – Promedio Multianual. Fuente: Elaboración propia con datos del CIOH (2010)	55
Figura 8. Ubicación de los afluentes (puntos rojos) de aguas continentales en la Ciénaga Mallorquín.....	56
Figura 9. Ubicación Punta Sabanilla (Imagen tomada de Google Earth, 11°2'38.80"N, 74°55'6.49"O)	58
Figura 10. Factores involucrados en los procesos costeros	59
Figura 11. Niveles del mar en épocas de lluvia (Octubre 2013). Fuente: HYDRAS 3, IDEAM.	60
Figura 12. Dirección de las corrientes del Caribe.....	62
Figura 13. Ubicación de los puntos de muestreo en la Ciénaga Mallorquín, Fuente: Tomado de la universidad del Norte (2005)	63
Figura 14. Perfiles de temperatura en la Ciénaga Mallorquín. Fuente: universidad del Norte (2005); POMCA (2006).....	64
Figura 15. Perfiles de Oxígeno Disuelto en la Ciénaga Mallorquín. Fuente: universidad del Norte (2005); POMCA (2006).	66
Figura 16. Variación Multitemporal de la Ciénaga Mallorquín. Fuente: “Ejecución de acciones para la implementación del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrografía de la ciénaga de Mallorquín Convenio 006 de 2010”. Pág. 306.	67
Figura 17. Conexiones ciénaga - mar (Boca). Imágenes de Google Earth.....	68
Figura 18. Ubicación de los puntos de medición y muestreo (imagen de fondo tomada de Google Earth).....	72
Figura 19. Resultados de las mediciones obtenidas para la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, para las épocas de secas y lluvias.....	73

Figura 20. Condiciones de frontera utilizadas para la modelación hidrodinámica (época de lluvias)	74
Figura 21. Condiciones de frontera utilizadas para la modelación hidrodinámica (época de secas)	75
Figura 22. Condiciones iniciales Salinidad (boxes) - época de lluvias (arriba), época de secas (abajo)	76
Figura 23. Condición de frontera abierta	77
Figura 24. Malla numérica utilizada para las simulaciones en la Ciénaga Mallorquín	78
Figura 25. Velocidad y dirección del viento impuesta en todo el dominio de simulación para la época de secas	80
Figura 26. Ubicación de las series de tiempo en la Ciénaga Mallorquín establecido dentro del modelo MOHID Studio	81
Figura 27. Batimetrías utilizadas para las simulaciones en época de secas (Izquierda) y en épocas de lluvias (Derecha) en la Ciénaga Mallorquín. Unidades de profundidad en metros.	82
Figura 28. Ajuste de salinidad, temperatura y Oxígeno disuelto	86
Figura 29. Campo de velocidades integradas en profundidad en época de secas, para el momento indicado en la figura.	87
Figura 30. Resultados series de tiempo – época de secas. Velocidades (m/s)	87
Figura 31. Campo de velocidades integradas en profundidad en época de secas, para el momento indicado en la figura. Simulación de Aportes de Agua Continentales	88
Figura 32. Resultados series de tiempo - AAC. Velocidades (m/s).	89
Figura 33. Campo de velocidades integradas en profundidad en época de secas, para el período de simulación de 8 Ene /13 – 11 Ene /13. Simulación hidrodinámica del viento como única forzante.	90
Figura 34. Resultados series de tiempo - Viento. Velocidades (m/s).	90
Figura 35. Salinidad simulada en época de secas (Período de simulación 8 Ene /13 – 11 Ene /13).	91
Figura 36. Resultados series de tiempo. Simulación de Salinidad (UPS).	92
Figura 37. Temperatura simulada en época de secas (periodo de simulación 8 Ene /13 – 11 Ene /13).	93
Figura 38. Resultados series de tiempo. Simulación de Temperatura (C°).	93
Figura 39. Oxígeno disuelto simulado en época de secas (Periodo de simulación 8 Ene /13 – 11 Ene /13).	94
Figura 40. Resultados series de tiempo. Simulación de Oxígeno Disuelto (mg/l).	95
Figura 41. Calibración hidrodinámica.	97
Figura 42. Campo de velocidades integradas en profundidad de la simulación hidrodinámica – época de lluvias, para el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13	99
Figura 43. Resultado series de tiempo – época de lluvias – Velocidades (m/s).	99
Figura 44. Campo de velocidades integradas en profundidad para la corriente de marea, para el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13	101
Figura 45. Campo de velocidades integradas en profundidad para la simulación de los AAC, en el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13	102
Figura 46. Series de tiempo. Velocidades (m/s).	102

Figura 47. Campo de velocidades integradas en profundidad para la simulación hidrodinámica forzada por el viento, en el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13.	104
Figura 48. Series de tiempo. Velocidades (m/s).....	104
Figura 49. Salinidad simulada en época de lluvias (Período de simulación 10 Oct /13 – 14 Oct /13)	105
Figura 50. Series de tiempo, salinidad (UPS).....	106
Figura 51. Temperatura simulada en época de lluvias (Período de simulación 10 Oct /13 – 14 Oct /13).....	107
Figura 52. Series de tiempo, temperatura (C°).	107
Figura 53. OD simulado en época de lluvias (Período de simulación 10 Oct /13 – 14 Oct /13)	108
Figura 54. Series de tiempo, oxígeno disuelto (mg/l).	109
Figura 55. (Azul) Viento época de lluvias, (Rojo) viento época de secas. Comparación de velocidades registradas en la serie de tiempo del centro de la Ciénaga Mallorcaín.	111
Figura 56. (Azul) AAC época de lluvias, (Rojo) AAC época de secas. Comparación de velocidades registradas en la serie de tiempo del centro de la Ciénaga Mallorcaín.	112
Figura 57. Batimetría para escenario hipotético 1. Profundidad en metros.	113
Figura 58. Hidrodinámica de la Ciénaga Mallorcaín con una batimetría modificada.	113
Figura 59. Series de tiempo. Velocidades de corriente (m/s).	114

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de las zonas costeras en términos generales radica, en que el 72% y el 20% de la superficie de la tierra está comprendido entre los mares y las zonas costeras respectivamente, además de que aproximadamente el 60% de la población mundial vive en las costas (Cicin-Sain *et al.*, 2006; INVEMAR, 2007); siendo espacios en donde se presentan y confluyen diversos procesos ecológicos, económicos, e institucionales, que le generan gran importancia y un estatus particular. Lo anterior requiere de una planificación y manejo específico, en torno a las problemáticas que en éstas áreas se presentan, con el objetivo de garantizar la conservación de estos ecosistemas, con el adecuado uso que se le da los recursos naturales que proporcionan este tipo de hidrosistemas, procurando de esta manera el desarrollo sostenible de los mismos.

Como parte de las investigaciones indispensables, que se deben llevar a cabo para lograr un mayor entendimiento de las zonas costeras, que permitan su protección y uso sustentable de estos hidrosistemas, está el realizar estudios de hidrodinámica y de transporte de contaminantes provenientes de los efluentes bien sean de origen industrial, doméstico o naturales (Cárdenas, 2007; Banderas, 1994). El estudio hidrodinámico y de transporte en hidrosistemas como las lagunas costeras, es una de las etapas más importantes que permite crear las bases necesarias para la planeación de acciones encaminadas hacia su recuperación y preservación, una debida planeación para el diseño de obras portuarias, además de ser complemento en el desarrollo de estudios biológicos, químicos y de calidad de agua en lagunas costeras.

En el presente proyecto de investigación se abarcará el estudio de los procesos de hidrodinámica y transporte que se dan en la Ciénaga Mallorquín, con la finalidad de analizar la influencia de los aspectos físicos como la marea, el viento y AAC en los procesos ya mencionados, mediante la implementación de un modelo numérico.

En el presente Capítulo 1, se presentan, además de la introducción al proyecto de investigación, los aspectos más relevantes que motivaron la investigación y se plantean los objetivos a cumplir por la misma.

En el Capítulo 2, se abarca el tema de la modelación hidrodinámica desde una perspectiva general, definiendo los procesos y fenómenos de transporte que se presentan en cuerpos de agua. Además se plantea un estado del arte sobre los diferentes modelos hidrodinámicos existentes y sus diferentes aplicaciones a nivel mundial.

En el Capítulo 3, se contextualiza la literatura existente sobre lagunas costeras y estuarinas, con lo que se permita definir el concepto de laguna costera y estuarina, entender en mayor medida los principales aspectos físicos e hidrodinámicos que influyen en su funcionamiento y cuál es la situación actual de estos importantes cuerpos de aguas.

En el Capítulo 4, se da una descripción general que envuelve al modelo empleado para este trabajo. Asimismo, se describe la estructura del modelo y algunos fundamentos teóricos necesarios para el entendimiento del modelo numérico MOHID Studio.

En el Capítulo 5, se realiza la descripción de la zona de estudio, se incluyen los aspectos físicos y teóricos que se han encontrado en la literatura y que son relevantes a los propósitos de esta tesis. Estos aspectos tienen la intención de describir las características físicas y dinámicas sobresalientes del área de estudio que han sido reportadas hasta antes de la elaboración de la presente tesis y que permiten dar una mejor interpretación de los resultados de la investigación. Además, se muestran los resultados de las campañas de medición y muestreo realizadas por diferentes entidades e instituciones nacionales, de las cuales se obtiene la información para llevar a cabo las simulaciones y los procesos de calibración del modelo.

El proceso de adaptación del modelo MOHID Studio, que comprende la configuración de las mallas numéricas y el establecimiento de las condiciones

iniciales y de frontera, es descrito en el Capítulo 6. Los resultados de las simulaciones y los respectivos análisis obtenidos a partir de la experimentación numérica, se encuentran en el Capítulo 7. La presentación de los resultados se organizó de acuerdo con las metas y objetivos de investigación planteados.

En el Capítulo 8 se establecen las conclusiones y recomendaciones que derivaron del estudio hidrodinámico y de transporte en la Ciénaga Mallorquín.

1.1. Justificación

Actualmente aspectos como el vertimiento de aguas residuales, la pérdida del manglar, la degradación del suelo, la existencia de rellenos sanitarios aledaños, procesos de sedimentación, asentamientos de invasión, entre otros, representan en general los problemas que afectan la hidrodinámica y el funcionamiento armónico dentro de la Ciénaga Mallorquín. La importancia de este sistema costero, principalmente para sus zonas aledañas, está expresada entre otros factores por lo socio-económico y ambiental.

La Ciénaga Mallorquín por sus características de laguna costera se establece como fuente de recursos ambientales que pueden ser aprovechables, siendo asiento de recursos alimentarios y (bajo otras condiciones) potencialmente turísticos. Teniendo en cuenta esto, la ciénaga es intensamente explotada, por lo que los beneficios ambientales que es capaz de suministrar, demandan acciones premeditadas que pretendan su desarrollo armónico y aprovechamiento de los mismos.

Al momento de tomar decisiones para contrarrestar los problemas que afectan a la ciénaga, la falta de conocimiento acerca del funcionamiento hidrodinámico, representa mayores dificultades para que dichas acciones desencadenen en mejorías perdurables en la Ciénaga Mallorquín. Por ende el estudio de la hidrodinámica de Ciénaga Mallorquín, mediante la aplicación de un modelo numérico, resulta fundamental para generar las bases del conocimiento y posterior

entendimiento acerca de los procesos hidrodinámicos y de transporte que se dan en la ciénaga y los fenómenos que le afectan (marea, viento y aportes de aguas continentales). A partir de lo anterior contar con las herramientas para proponer soluciones viables a los múltiples problemas que enfrenta, sean estos de origen natural como antrópico.

Por consiguiente la dinámica en las lagunas costeras esta frecuentemente dominada por la acción de la marea, por lo que sus condiciones hidrográficas están establecidas por la intensidad de mezcla que exista entre el agua proveniente de los escurrimientos de aguas continentales y el agua oceánica. La marea tiene un papel importante en el equilibrio ecológico de los sistemas costeros, permitiendo un intercambio energético con las aguas oceánicas, con este intercambio se genera el transporte neto de masa, disuelto o en suspensión. A pesar de esto, no se tiene claro conocimiento de qué proceso físico domina, ni el papel que cada uno desempeña en la hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín, entre otras causas, ante la inexistencia de estudios hidrodinámico de la ciénaga mediante el uso de modelos numéricos como el MOHID Studio, por lo que este estudio buscará establecer algunos conceptos como apoyo para un mejor entendimiento de la dinámica en la Ciénaga Mallorquín. El resultado de estos estudios es la base para futuros temas a tratar como pueden ser la calidad del agua (por medio de la predicciones de la dispersión y distribución de contaminantes) o recursos naturales (nutrientes) que en estos hidrosistemas proliferan, estudios hidrosedimentológicos, entre otros.

La aplicación del modelo hidrodinámico MOHID Studio en la Ciénaga Mallorquín, permite reproducir y describir el comportamiento del sistema costero para las diferentes épocas climáticas, permitiendo fundamentalmente pronosticar las reacciones en la dinámica de circulación de la ciénaga bajo diferentes condiciones que se puedan presentar, como pueden ser las constantes alteraciones en la magnitud y velocidad de los vientos, aumento en los aportes de aguas continentales, variación en la entrada de masas de agua de mar, cambios en las batimetrías por azolvamiento, dragados o construcciones de obras portuarias o

marítimas, entre otras. En general acciones que se pueden presentar en la ciénaga es el trabajo de dragado, el cual puede ser una solución al azolvamiento que presenta la Ciénaga Mallorquín, por lo que es importante contar con el conocimiento del campo vectorial de velocidades de corrientes que se presentan en la ciénaga, dado que estos son los causantes y ofrecen el conocimiento de la dirección del transporte y secuencialmente ubicación del depósito de sedimentos. Lo anterior no puede darse correctamente si no se tiene conocimiento en general de las condiciones hidrodinámicas del sistema, por lo que se establece así a la modelación hidrodinámica como pieza a tener en cuenta a la hora de rehabilitar las condiciones ambientales dentro de la Ciénaga Mallorquín. Por otra parte, la importancia de los modelos numéricos como el MOHID Studio, para el estudio de las condiciones hidrodinámicas y de transporte en la Ciénaga Mallorquín radica en su adaptabilidad a las condiciones del sitio, su flexibilidad para evaluar diversos escenarios y estados del sistema, y su uso para establecer condiciones futuras, dado que un modelo numérico adecuadamente calibrado puede convertirse en una herramienta de gestión, manejo, diagnóstico y prospección muy útil para las personas encargadas del manejo y la administración de este tipo de recursos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar, mediante la modelación numérica, la influencia de los procesos físicos como la marea, el viento y aportes de aguas continentales en la hidrodinámica y transporte de la Ciénaga Mallorquín bajo condiciones climáticas de lluvias y secas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Adaptar un modelo hidrodinámico y de transporte a la Ciénaga Mallorquín.

- Evaluar la influencia de las forzantes de marea, viento y aportes de aguas continentales en la hidrodinámica de la ciénaga para las épocas de secas y lluvias.
- Determinar por medio de la simulación de transporte, el comportamiento de la salinidad, temperatura y OD dentro de la Ciénaga Mallorcaín para las dos épocas seleccionadas.
- Presentar un análisis de las respuestas hidrodinámicas y de los parámetros de salinidad, temperatura y OD de la Ciénaga Mallorcaín, mediante pronósticos bajo diferentes escenarios de modelación.

2. Consideraciones generales sobre modelación hidrodinámica

2.1. Introducción

Un modelo matemático es una formulación idealizada que representa la respuesta de un sistema físico ante un estímulo externo, por lo cual tener como base una adecuada representación de la realidad física resulta fundamental para cualquier modelo hidrodinámico y de calidad de agua. Los modelos numéricos han evolucionado desde los más simples hasta los modelos en dos y tres dimensiones de alta aproximación. A nivel mundial, son variados los proyectos que incluyen modelos numéricos para flujos a superficie libre, estos modelos van desde los de tipo más simple hasta los más complejos. Los modelos que se aplican para el estudio de cuerpos de agua usualmente se constituyen teniendo en cuenta los componentes hidrodinámicos y calidad de agua, en general los aspectos hidrodinámicos son independientes de los de calidad de agua, sin embargo, estos últimos dependen de los procesos de transporte, en consecuencia, cuando se aplican modelos numéricos es necesario el entendimiento de las condiciones físicas basada en la buena representación de los fenómenos físicos que se quieran estudiar para un determinado caso, de esta forma, sí lo que se quiere es estudiar el comportamiento hidrodinámico en zonas costeras hay que tener en cuenta que los sistemas costeros estuarinos resultan muy complejos, dado que incluyen múltiples variables y procesos que implican interacciones altamente no lineales. El estudio conjunto de la hidrodinámica y la calidad del agua en zonas litorales requiere el desarrollo de una base común que permita la resolución de las ecuaciones que representan el comportamiento físico del agua (conservación de masa y ecuaciones de cantidad de movimiento) y las ecuaciones de transporte de masa (ecuaciones de advección – difusión – reacción de sustancias disueltas en el agua) (Pinho *et al.*, 2004), más adelante se mostraran los sistemas de ecuaciones que el modelo resuelve para representar el comportamiento físico del agua.

2.2. Procesos de transporte

Los cuerpos de agua naturales en superficies están sujetos a la permanente renovación por medio de la constante entrada y salida de agua, a tasas muy variables dependiendo del tipo de cuerpo. Este transporte de agua está acompañado por el transporte de energía mecánica (momentum), térmica (calor) y de sustancias (masa) que viajan como suspensiones o en solución. Cada uno de estos fenómenos que ocurren en los cuerpos de agua, condicionan la proliferación de la vida acuática, así como demás procesos que se presenten. Tenemos que la evolución de la concentración de una sustancia presente o introducida en un medio acuático depende de la acción conjunta de tres procesos, la advección, difusión o dispersión y los procesos de transformación (Koutitas, 1998; Fennel y Neumann, 2004).

2.2.1. Fenómenos de transporte

2.2.1.1. *Advección*

La advección se puede definir como el mecanismo de transporte impulsado por el movimiento del fluido mismo, (Barrios y Ramírez, 2012) o como el transporte impuesto por un sistema de corrientes, ejemplo: corriente de un río o de mareas, causadas por un gradiente de presión; corrientes horizontales causadas por un gradiente de densidad (Farreras, 2006). El transporte advectivo se expresa en términos del vector de flujo a lo largo de un eje dado por unidad de área perpendicular a ese eje. El mecanismo de transporte advectivo es un mecanismo de macroescala comparado con los mecanismos de transporte dispersivo que son mecanismos de microescala (Barrios y Ramírez, 2012).

2.2.1.2. *Dispersión*

El termino dispersión hace referencia a los procesos de transporte que sufren las sustancias disueltas o partículas y que están directamente relacionados con el desplazamiento de las masas de agua. Al transporte por dispersión le contribuyen tres procesos:

- *Difusión molecular:* esta resulta ser el desplazamiento aleatorio de las partículas de solutos entre las moléculas de agua debido al movimiento browniano de las partículas. La difusión molecular ocurre aún sin la presencia de movimiento de flujo y depende de las propiedades del fluido. En síntesis y de acuerdo con la ley de Fick, las moléculas se desplazan desde las zonas de mayor concentración a las de menor, por lo que siempre que exista un gradiente de concentración, se presentara este fenómeno.
- *Difusión turbulenta:* esta hace referencia al transporte de sustancias disueltas y pequeñas partículas por turbulencias a pequeña escala. Se trata de un transporte a microescala producido por fluctuaciones turbulentas de la velocidad instantánea, estas fluctuaciones se dan por los esfuerzos cortantes que se presentan en el interior de las masas de agua.

Dispersión: La interacción entre la difusión turbulenta y los gradientes de velocidad genera un mecanismo de mezclado de mayor grado conocido como dispersión. El transporte de momentum, de calor o de masa en ríos está dominado por la advección, mientras que en lagos, lagunas o estuarios el que domina es el mecanismo de dispersión (Barrios y Ramírez, 2012).

2.2.2. Ecuación de Advección – Difusión

La ecuación que describe los mecanismos de advección y dispersión de una propiedad física, una sustancia o material disuelto en un flujo, se basa en:

- El principio de conservación de masa, y
- La segunda ley de Fick.

El principio de conservación de masa para una sustancia, considerando efectos reactivos, está determinado por la ecuación 1 (Barrios y Ramírez, 2012):

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{Razón de cambio}} + \underbrace{U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z}}_{\text{Términos advectivos}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)}_{\text{Términos de difusión}} \quad (1)$$

donde C representa la concentración de la sustancia (en unidad de masa por unidad de volumen), E_x , E_y y E_z (en m^2/s) son los coeficientes de dispersión en las direcciones x , y y z , respectivamente. Los mecanismos de transporte por advección y por difusión son caracterizados por los términos advectivo y de difusión, respectivamente, y se indican con las llaves (Barrios y Ramírez, 2012).

2.3. Modelación hidrodinámica

Con el desarrollo tecnológico de los modelos numéricos, junto con el avance de los sistemas computacionales, la modelación hidrodinámica se ha convertido en parte de una disciplina más amplia: la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, los modelos hidrodinámicos usados para aplicaciones en sistemas acuáticos (ríos, zonas costeras, etc.) están estrechamente relacionados a los modelos desarrollados para la meteorología, la aeronáutica, y otros. La base común de estas actividades de modelación es la solución numérica de las ecuaciones de conservación de momento y de masa en un fluido (Torres – Bejarano *et al.*, 2012).

Los modelos hidrodinámicos se encuentran fundamentados por un conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos: las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son un sistema de derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido (líquidos y gases), no se conocen métodos

de solución analíticas para las ecuaciones, por lo que se hace necesario recurrir al análisis numérico para determinar soluciones aproximadas. Para la modelación hidrodinámica, las ecuaciones de Navier-Stokes son simplificadas de acuerdo a las propiedades específicas del cuerpo de agua. Resultando comúnmente para ríos, estuarios, lagos, zonas costeras, las ecuaciones para aguas someras, así llamadas debido a que la escala horizontal es mucho más grande que la vertical (Torres – Bejarano *et al.*, 2012).

En primera instancia se destaca que la aplicación de un modelo de calidad de agua en cualquier sistema acuático lleva consigo la necesidad de un apropiado conocimiento de la hidrodinámica del sistema, por tanto, es necesario contar con un modelo hidrodinámico calibrado y que permita reproducir distintos escenarios hidrológicos, provocadas por las condiciones meteorológicas dominantes en la zona de estudio. Los estados de calidad de agua en sistemas acuáticos se ven afectados a las condiciones dinámicas predominantes en dichos sistemas, en consecuencia a la meteorología de la zona, con lo cual la modelación hidrodinámica permitirá entender qué agentes controlan el movimiento del agua y cómo la misma se verá afectada ante diferentes modificaciones pudiendo ser estas de carácter natural o artificial. En la actualidad, la modelación hidrodinámica incluye una variedad de aproximaciones comúnmente empleadas en diversos estudios. Se tiene en cuenta que la rápida evolución de la informática ha permitido que se den avances significativos en el desarrollo de la modelación hidrodinámica por medio de motores numéricos, permitiendo entre otras cosas, la facilidad para acceder a modelos numéricos, dado que la mayoría son de código libre, es decir, están disponible de forma gratuita para su uso con fines científicos. En todos los modelos hidrodinámicos, las ecuaciones básicas que los sustentan son universalmente conocidas, existiendo una gran variedad de métodos para resolverlas. La modelación hidrodinámica es la herramienta que actualmente permite realizar estudios hidrodinámicos de manera rápida y económica.

2.3.1. Estado del arte

A nivel mundial el desarrollo de trabajos basados en modelación hidrodinámica, se ha caracterizado por la gran variedad de ecosistemas acuáticos que han sido usados como objetos de estudio, en sistemas costeros se pueden mencionar el realizado por Pearson *et al.*, (1997) el cual se trabajó en la Laguna Lodón, Inglaterra, usando un modelo barotrópico por medio de la técnica de elementos finitos de alta resolución, encontraron que la onda de marea indujo cambios en la entrada de una laguna costera. Jayaraman y Mohanty (1998) por medio del estudio hidrodinámico de la laguna de Chilika analizaron la circulación del sistema bajo un modelo bidimensional, reportando cuatro sectores de circulación en la hidrodinámica del sistema. Platonov *et al.*, (1998) analizó la armonía de las corrientes y las respuestas de la modificación del nivel del agua ante la presencia de bajos en aguas costeras en el complejo lagunar Mundaú – Manguaba, en Brasil. Libelli *et al.*, (2002), trabajando mancomunadamente con la modelación hidrodinámica y calidad del agua para la laguna de Orbetello, Italia, desarrollaron una estrategia de control en la estación de bombeo, teniendo en cuenta la simulación numérica de los efectos de las forzantes naturales (viento y marea). Martínez-López y Pérez-Sierra (1997), por medio de la aplicación de un modelo hidrodinámico barotrópico en el Golfo de México, teniendo en cuenta el forzamiento realizado por la marea natural de la zona y vientos dominantes, encontraron que dichas forzantes al ser implementadas simultáneamente al modelo, se genera una circulación anticiclónica en la región occidental del Golfo de México. Obeso *et al* (1999), simularon numéricamente la propagación de las componentes de la marea M2, N2, S2, 1(2, 01 y K1 en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas, mediante un modelo numérico hidrodinámico barotrópico, desarrollado en diferencias finitas, Las velocidades máximas, registradas y modeladas en el área de estudio, ocurrieron durante el reflujo de la marea. La componente de velocidad Este fue la más importante en Boca Entrada, mientras que para la zona de canales "Canal Gaviota y Canal Rehusa", fue la Norte. Coronado *et al.*, (2007), determinaron en la laguna arrecife de Puerto Morelos por

medio de la influencia de la corriente de Yucatán, un régimen de vientos alisios, condiciones de circulación normales y bajo las condiciones de verano extendido con altura de onda baja y la disminución en el nivel del mar, el intercambio de la laguna con el mar adyacente se redujo drásticamente. Torres-Freyermuth *et al.* (2012), establecieron por medio de los resultados numéricos la fuerte correlación entre la energía mareomotriz de elevación del mar en exterior y el sistema, en contraste, las ondas infra gravitatorias se muestran a ser el resultado de un patrón más complejo que depende fuertemente de la geometría del arrecife. De las investigaciones anteriormente citadas, se puede establecer el factor común que representa el uso de modelos numéricos hidrodinámicos, para el estudio y representación de la marea y sus componentes dentro de sistemas lagunares o estuarinos, sirviendo de referencia para el presente estudio, dadas las similitudes que se tiene entre los trabajos referenciados y los objetivos del presente trabajo de investigación.

2.4. Sobre los modelos de simulación hidrodinámica

Un modelo hidrodinámico es una herramienta que describe o representa, de alguna manera, el movimiento del agua. Anteriormente, cuando todavía no se daba un importante desarrollo computacional, un modelo hidrodinámico era un modelo físico construido a escala. Sin embargo, virtualmente todos los modelos hidrodinámicos usados en la actualidad son modelos numéricos computacionales (Torres – Bejarano *et al.*, 2012).

En el último tiempo en el campo de la hidrodinámica, la modelación matemática ha adquirido mayor relevancia. De esta forma, en el campo de la hidrodinámica ambiental, gran parte de las decisiones que se toman hoy en día son con base en modelos matemáticos mecanicistas (Instituto Nacional de Hidráulica, 2010). A partir de esto surge la necesidad de simular de manera conjunta los fenómenos que interactúan en un cuerpo de agua como, el transporte de sedimentos, cambios en las corrientes de densidad, la estratificación térmica, la dispersión de

contaminantes, la calidad de agua, los forzadores atmosféricos, las mareas, entre otros, impulsando la apertura al desarrollo de nuevos y más complejos modelos numéricos. Es así, como durante la década de los años 90 se presenta un auge en el desarrollo de los modelos hidrodinámicos y es en estos diez años, donde se construyen y programan la mayoría de modelos 2D y 3D que aun hoy están vigentes, como por ejemplo MOHID, ELCOM, EFDC3D, COHERENS, ROMS, MIKE 3, DELF 3D, manteniéndose el continuo desarrollo de nuevas aplicaciones y usos.

La importancia de los modelos hidrodinámicos radica en que son utilizados para cuantificar los impactos ambientales producto de proyectos, o para considerar la viabilidad de una obra en particular, por lo que se consideran una herramienta fundamental en la toma de decisiones. En general la mayoría de modelos numéricos de fluidos derivan sus ecuaciones del principio de continuidad, de la ecuación de Navier-Stokes (2da ley de Newton) y de las ecuaciones de la Termodinámica. En particular, todos los modelos hidrodinámicos aplicables a los estudios de lagunas costeras, estuarios y costas, y en el caso del modelo usado en la presente investigación están basados en el modelo de ondas larga en base a las ecuaciones RANS (Reynolds Average Navier Stokes), de ahí la similitud entre los modelos, sin embargo, esto no es tan así, pues existen diferencia entre ellos, dependiendo de la suposición realizada para completar y simplificar las ecuaciones. Quizás la más importante en términos prácticos, es la ecuación de cierre de la turbulencia asumida, otras diferencias significativas se pueden encontrar en los supuestos para simplificar las ecuaciones, como por ejemplo el supuesto de presión hidrostática, de la densidad, etc.

2.5. Métodos de solución de las mallas numéricas

Las ecuaciones diferenciales planteadas para simulaciones de fenómenos físicos, requieren para su solución la implementación de métodos numéricos, muchos de los cuales asumen que el dominio de interés puede ser dividido en pequeños

elementos cuya unión y continuidad forman una malla (García, 2008; Bern and Eppstel, 1992).

La malla es la representación discreta de la geometría del dominio en donde el problema va a ser resuelto. Divide la solución del dominio en una cantidad limitada de subdominios (pueden ser elementos, volúmenes de control, etc.). En estos subdominios se calculan las diferentes variables incluidas en una ecuación de conservación. Existen dos tipos de mallas y son: las estructuradas y las no estructuradas, para las mallas estructuradas se establece que en cada elemento de control se cuenta con el mismo número de elementos vecinos, por el contrario en una malla no estructurada los elementos de control tienen diferentes números de elementos vecinos. Los modelos numéricos utilizan mallas estructuradas o no estructuradas, las cuales están compuestas de celdas con figuras definidas como cuadrados y rectángulo (Sámano, 2011); y se basan, comúnmente, en diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos.

Los modelos que utilizan el método de diferencias finitas para la discretización de las zonas de estudio requieren menos memoria de cómputo y ofrecen la posibilidad de controlar directamente la forma y el tamaño de cada elemento. Como desventaja de las mallas estructuras y las diferencias finitas, es su poca flexibilidad para ajustarse a dominios con geometrías complicadas, lo que las hacen poco atractivas para efectuar simulaciones en lugares donde abunden islas, estrechos y en general líneas costeras irregulares (García, 2008).

Por su parte, los métodos de elementos finitos permiten una mayor flexibilidad mediante la subdivisión del sistema en triángulos que pueden variar en forma y tamaño. Asimismo, permiten seguir fielmente la morfología y la batimetría de la zona de estudio además de que hacen posible una mejor representación de aquellas áreas donde la actividad hidrodinámica es más interesante e importante (Tejera y Vásquez, 2013). En cuanto a los diferentes tipos de mallas que se pueden utilizar, el método de los volúmenes finitos cuenta con la misma flexibilidad que el método de los elementos finitos, pero restringido a elementos con lados rectos o caras planas. El enfoque de volúmenes finitos es ligeramente diferente al

método de diferencias finitas y posee como gran ventaja la facilidad para representar condiciones de frontera. Este método considera la discretización espacial, como un conjunto finito de regiones contiguas que se conocen como volúmenes de control, en vez de considerar un conjunto de puntos como en otros métodos. En cada volumen de control se aplican las ecuaciones de conservación en donde las variables son calculadas en el centro de ese volumen de control. Los valores de esas variables en la superficie del volumen de control se calculan mediante la interpolación del valor de la variable en el centro.

3. Contextualización sobre lagunas costeras y estuarinas

3.1. Introducción

Los estuarios por sus características morfológicas son considerados cuerpos de agua en donde se desemboca un río en el mar y además las mareas actúan como regulador biofísico. En general presentan una salinidad intermedia y es característica su alta productividad ambiental, en su mayoría por la entrada de nutrientes a parte de otros elementos contribuidos por los sistemas acuáticos, marinos y dulceacuícolas. Los estuarios suelen formar una cuenca semi-cerrada en contacto con el mar abierto, en la cual el agua dulce de los ríos alcanza a contener cantidades mesurables de sal marina.

Actualmente se acepta como definición más adecuada la propuesta por Pritchard (1967): "Estuario es un cuerpo o masa de agua costera semi-encerrada, con conexión libre al mar abierto, y en el cual es medible la dilución del agua de mar por agua dulce proveniente de la tierra" (Figura 1). Su estado semi-encerrado repercute en que su dinámica de circulación es dominada por las fronteras laterales, lo cual lo convierte en un cuerpo costero, sin embargo no forma parte de la línea de costa en si misma; esto permite que sea distinguido de cuencas de mayor tamaño como una bahía o un golfo. Además se tienen en cuenta otras consideraciones al momento de definir y distinguir a los estuarios de otros cuerpos de aguas, como son la conexión libre al mar abierto, lo que significa que la comunicación entre el océano y el estuario debe permitir el intercambio de agua, sal, y la transmisión de la energía de la marea permanentemente, durante todos los periodos del año y que la dilución de agua de mar sea medible significa que la salinidad en el interior del estuario debe ser menor que en el océano adyacente.

Las lagunas costeras dadas sus características son definidas como cuerpos permanentes de agua de baja profundidad. Las ciénagas por el contrario, son cuerpos de agua originados por la acción de las corrientes de los ríos, que dan lugar a la formación de cuencas mediante la deposición de sedimentos y por la acción erosiva de diferentes agentes (Marín, 2000). La definición más aceptada de lagunas costeras, entre otras es la dada por Lankford (1976), refiriéndose expresamente a estas cuencas en México, define: "laguna costera es una depresión en la zona costera, bajo el nivel de pleamar media superior (sigla MHHW en inglés), que tiene una conexión permanente o efímera con el mar, pero protegida de este por algún tipo de barra" (Figura 1a). Una definición más reciente y similar a la hecha por Lankford la realiza Miranda *et al.* (2002), al proponer la siguiente definición: "La laguna costera es un sistema marino poco profunda, orientada generalmente en forma paralela a la costa, separado del océano por una barrera, conectada con el océano al menos intermitentemente por uno o más canales."

Las diferencias establecidas en cuanto a la circulación, que pueden haber entre lagunas costeras y estuarinas, recae principalmente en los tipos de flujos que se presentan en cada hidrosistema, de acuerdo con la morfología característica de cada uno (Figura 1), dada la importancia que esto ejerce en el funcionamiento de los mismos, es así como tenemos que el flujo de agua dulce causa un patrón particular en la circulación, el cual, dado que es menos denso que el flujo de agua del mar, fluye hacia afuera del estuario en la capa superficial, mientras que el flujo salino, más denso, fluye hacia adentro del estuario por el fondo (Barrios y Ramírez, 2012). Esta propagación del flujo se da en estuarios que presentan descargas de río moderadas y el proceso de mezclado por la corriente de marea es débil. Según Pritchard (1967) y Barrios y Ramírez, (2012), cuando el volumen de agua dulce que ingresa al estuario es mayor que el que se pierde, el estuario es positivo, o actualmente se le denomina cuenca estuarina, en el caso inverso, el estuario es negativo o es conocido como cuenca no-estuarina.

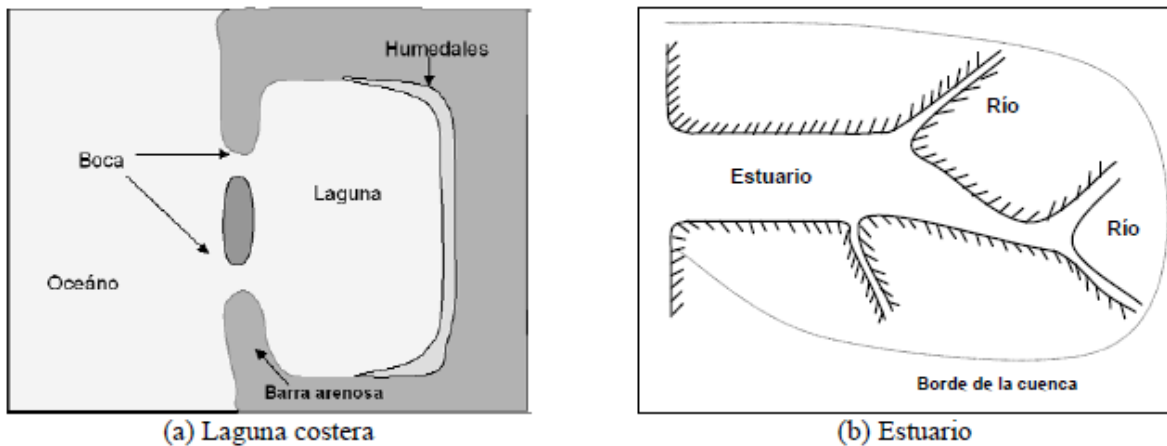


Figura 1. Esquema de la morfología típica de una laguna costera y un estuario. Fuente: Barrios y Ramírez, 2012

De igual forma en las lagunas costeras también se da este tipo de circulación, asumiendo que presentan características estuarinas, sin embargo, no en todos los casos, dado que hay que considerar si los aportes de aguas continentales por medio de los ríos y demás escorrentías son casi nulos o totalmente nulos. Según Barrios y Ramírez, (2012), con relación a su morfología, la diferencia primordial entre una laguna costera y un estuario, es que el estuario se configura de manera cuasi perpendicular a la costa (valle de río inundado), mientras que en una laguna costera el eje principal es cuasi paralelo a ésta. Las lagunas costeras y los estuarios como cuerpos de agua difieren en términos geomorfológicos, pero son afines en términos ecológicos (Margalef, 1969).

3.2. Procesos físicos que influyen en la hidrodinámica de los sistemas costeros

Es variado el número de factores que ejercen influencia en la dinámica de circulación y transporte dentro de las lagunas costeras, siendo estos de gran importancia para el funcionamiento de los ecosistemas costeros. Gran parte de las forzantes influyentes en cada proceso ocurrido dentro de una laguna costera están: mareas, viento, aportes de aguas continentales, gradientes de densidad, presión barométrica, fricción en el fondo y paredes laterales y efecto coriolis, principalmente.

3.2.1. Efectos de la marea

La marea astronómica es la que se da por medio de la atracción gravitacional que ejercen los astros sobre la Tierra, la cual se manifiesta en el océano como un cambio regular del nivel del mar. La marea en el océano abierto se comporta como una onda estacionaria de Kelvin que al acercarse a la costa, esta onda sufre una serie de modificaciones en su amplitud y velocidad por los efectos del fondo (Barrios y Ramírez, 2012). Este tipo de marea es la que mayor acción presenta sobre las lagunas costeras y estuarios, además de ser predecible, periódica y la más importante en magnitud. Los efectos de la marea dentro del sistema lagunar costero son importantes dado que ante el escaso y a veces nulo aporte (tratándose de lagunas costera no estuarinas) de aguas continentales, las mareas permiten el flujo y reflujo de las masas de aguas, genera un aporte energético por la entrada de la onda por medio de la marea entrante y el aporte de nutrientes en el sistema lagunar, por tanto, se dan las renovaciones necesarias para el desarrollo de los procesos de circulación y transporte que en las lagunas costeras ocurren.

3.2.1.1. Clasificación de las mareas

El forzamiento astronómico de las mareas produce una periodicidad en su ascenso y descenso. La mayor altura alcanzada se denomina PLEAMAR y la menor BAJAMAR. La diferencia entre ellas equivale a la amplitud. El ascenso y descenso del mar en determinada zona requiere una entrada de agua en las horas previas a la pleamar y una salida en las horas siguientes, estos movimientos o corrientes mareales corresponden a los flujos (entrantes) y reflujos (vaciante), respectivamente. La marea diurna, tiene una marea alta y una marea baja cada día lunar y la marea semidiurna, siendo la que se presenta en el litoral del Caribe

(Figura 2), tiene dos mareas altas y dos mareas bajas con altura casi igual diariamente.

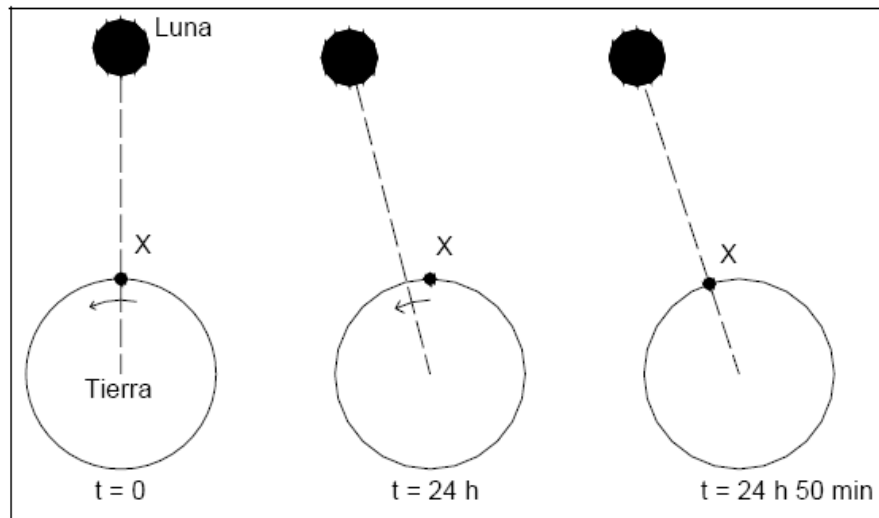


Figura 2. El periodo de las mareas semidiurnas es de 12 h 25 min, debido al movimiento de rotación de la Luna alrededor de la Tierra. X es un punto sobre la superficie de la Tierra. Tarda 24 h 50 min en volver a estar alineado con la Luna (IDEAM, 2014).

3.2.1.2. Componentes armónicos de las mareas

Se tiene establecido que las características de las mareas varían con el tiempo y el lugar, aun así los mecanismos de forzamiento son regulares y predictibles. Además del forzamiento astronómico primario de las mareas, mucha de su variabilidad se debe a los efectos batimétricos y a la fuerza de Coriolis.

La combinación de los diferentes mecanismos de forzamiento astronómico descritos, crean la marea astronómica total. Mediante el análisis armónico de los niveles del agua observados durante largos períodos, en un punto de observación, se puede diferenciar la contribución de cada mecanismo individual, estos elementos se denominan componentes de la marea, dentro de los cuales pueden mencionarse los siguientes (IDEAM, 2010):

- M2, describe las fuerzas gravitacional y centrífuga generadas por la rotación del sistema Tierra-Luna.

- S2, representa la contribución de la atracción gravitacional del Sol.
- N2, describe los cambios en la distancia entre la Tierra y la Luna.

K1, O1 y P1 describen los cambios en la declinación del plano Tierra-Luna-Sol.

3.2.2. Efectos del viento

El viento ejerce una gran influencia sobre la superficie de las lagunas costeras y sobre el mar adyacente al sistema costero. Los principales efectos del viento en las lagunas costeras se dan por medio del aumento de la evaporación, el apilamiento del agua en la dirección en que sopla el viento y en la formación de olas, por lo que el viento transfiere energía o movimiento a la superficie del agua generando lo que se conoce como circulación inducida por el viento (Barrios y Ramírez, 2012). Dentro de los efectos generados en el mar adyacente está el intercambio con el océano, generalmente que se da a través de un canal estrecho que favorece el efecto de "filtro natural pasabajos" (Wong, 1987), aumentando la importancia relativa de la propagación de ondas de frecuencias bajas en su interior. Estos flujos en frecuencias bajas (residuales) producen las condiciones de renovación de agua a largo plazo que controlan su calidad y el transporte de sedimentos entre otros.

3.2.3. Efectos de densidad

Hesselberg y Sverdrup (1914) establecen que la densidad de una masa de agua de mar está determinada exclusivamente por su temperatura, salinidad y presión (Farreras, 2004). La expresión más comúnmente utilizada para estimar las variaciones de densidad es la de la UNESCO (1981ab), y se escribe de la forma siguiente manera:

$$\rho(P, T, S) = \frac{\rho_0}{\left(1 - \frac{P}{k_p}\right)} \quad (2)$$

Donde T es la temperatura (en K), S es la salinidad (en ups), y k_p es un coeficiente que varía en función de la presión, la temperatura y la salinidad. Para el caso de lagunas costeras, por ser en general muy someros, las variaciones verticales de la presión se pueden considerar despreciables, por lo que las variaciones de densidad son únicamente función de la temperatura y la salinidad (Farreras, 2004; Barrios y Ramírez, 2012). Estos dos parámetros (T y S) son en general independientes entre sí, de manera que los gradientes de densidad en las lagunas costeras se generan indistinta e independientemente por los gradientes de salinidad o de temperatura.

3.2.4. Aportes de aguas continentales

La presencia de descargas de agua dulce por afluentes es típica (por definición) de las lagunas costeras estuarinas, y en algunos casos estacionalmente en las no-estuarinas.

Como consecuencia de la presencia de descargas de agua dulce en lagunas costeras, se presenta: estratificación en 2 capas verticales (de agua dulce y de agua salada) generando una circulación estratificada, descargas de intercambio de agua entre el afluente y la laguna, influencia en la rapidez de renovación del agua de la laguna, y modificación del transporte de materia por difusión turbulenta y por dispersión (Farreras, 2004; Barrios y Ramírez, 2012).

3.2.5. Turbulencia

En la naturaleza, la característica dominante de los fluidos es que son turbulentos, dado el desarrollo y decaimiento de remolinos dentro del flujo de manera

totalmente irregular y aleatoria. Siendo el tipo de flujo que más se presenta, aun así resulta difícil definir el estado de un fluido turbulento, aunque se tiene en cuenta que la turbulencia es “el movimiento irregular del fluido en donde las variables muestran una variación aleatoria en el espacio y en tiempo”, siendo esta una definición con gran aceptación. Partiendo del hecho que los flujos turbulentos representan un papel importante en las tasas y tiempos de distintos modos de transporte, como pueden ser de *momentum* o de materia, para la gran cantidad de fluidos geofísicos, se tienen como características más importantes:

- Debido a que son irregulares y de gran aleatoriedad generan la necesidad de usar métodos estocásticos para descubrir las propiedades turbulentas.
- Por su enorme difusividad provocan un gran intercambio de momentum, masa y calor, permitiendo una mezcla rápida de cualquier propiedad o sustancia en el fluido.
- Altamente tridimensional, presentando fluctuaciones de velocidad en todas las direcciones.
- La energía cinética se disipa debido a la viscosidad, dado que los flujos turbulentos son siempre disipativos. Es necesario un suministro constante de energía del flujo medio para que se mantenga la turbulencia debido a la imposibilidad de la turbulencia de mantenerse por sí sola.
- Números de Reynolds altos.

Un fluido al ser una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, por lo que un fluido no es capaz de soportar tensiones de corte sin dejar de estar en reposo, implica que cuando un fluido está en movimiento, existirán tensiones de corte debidas a la viscosidad. En fluidos ideales para los que se tiene en cuenta la mayoría de las teorías de oleaje, los flujos son no viscosos por lo que a diferencia de los viscosos no presentan tensiones de corte cuando se encuentran en movimiento. Las ecuaciones más completas y que representan el movimiento laminar y turbulento de los fluidos viscosos afectados por la gravedad son las ecuaciones de Navier Stokes. Se tiene en cuenta que los fluidos en la naturaleza son turbulentos, mientras que los fluidos

laminares solo se pueden recrear bajo condiciones especiales principalmente en laboratorio. Teniendo en cuenta lo anterior si el flujo se mueve a una velocidad menor que una determinada velocidad critica, el régimen es laminar, si excede ese valor umbral, el fluido se tornará turbulento, presentando creación de inestabilidades que engrandecen la generación de vórtices y remolinos.

3.3. Dinámica en lagunas costeras

La dinámica de circulación, transporte de materia o cualquier proceso que ocurra dentro de sistemas acuáticos como lagunas costeras, están afectados por los siguientes factores: acción de las mareas, descargas de aguas continentales, el esfuerzo del viento, gradientes de densidad, aspectos físicos de las lagunas como el tamaño, forma, profundidad, la presión barométrica, la fricción del fondo y las paredes verticales de la cuenca, y el efecto de Coriolis.

El movimiento de las corrientes generalmente es irregular, causando un proceso de mezclado que puede caracterizarse por una amplia gama de escalas en función de los gradientes medios de velocidades, tanto en el plano vertical como en el horizontal. El desplazamiento del agua es caracterizado por movimientos erráticos de partículas de fluido e intercambios laterales considerables de cantidad de movimiento. La dinámica de un fluido puede caracterizarse por dos contribuciones: una debido al transporte advectivo (el cual puede incluir o generar el movimiento turbulento), y la otra debido a la difusión molecular, la cual está siempre presente aún en condiciones de reposo y expresa la tendencia de un fluido de llegar a la uniformidad (Barrios y Ramírez, 2012).

3.1. Situación actual de las lagunas costeras en Colombia

Se conoce que los sistemas estuarinos y lagunas costeras en Colombia, al igual que otros ecosistemas marinos, están siendo afectados en diferentes grados por el aumento constante en los niveles de contaminación de las áreas marinas y

costeras del país. Siendo esto detonante para un mayor interés por parte de la opinión pública y como consecuencia, en la implementación de acciones técnicas y de otro tipo, por parte de entidades estatales y privadas, encaminadas hacia la prevención y control de la contaminación de los litorales colombianos (Garay, 1997; INVEMAR, 1996; Marín, 2000), a pesar del intento, aun se evidencian desarticuladas estrategias para llevar los objetivos planteados por las autoridades, siendo causa del gran deterioro ambiental y social que hidrosistemas costeros como la Ciénaga Mallorquín presenta en la actualidad. Además, si tenemos en cuenta que las principales fuentes de contaminación marina y costera se originan como resultado de las actividades realizadas en tierra y varían de una zona a otra, de acuerdo con su naturaleza e intensidad. En las áreas costeras en las que se localizan los ecosistemas mencionados, estas actividades deterioran la calidad del agua de los ríos que se descargan en las costas y por tanto, la calidad ambiental de dichos ecosistemas (Garay y Castro, 1990; INVEMAR 1996; PNUMA, 1999a). En este caso de estudio y para efectos de indicar la naturaleza y origen de la Ciénaga Mallorquín, esta se considera como una laguna costera dadas sus características morfológicas y de origen, la cual puede presentar de acuerdo a la época del año, características de laguna costera estuarina, aun así la ciénaga es catalogada como un sistema costero con predominancia no estuarina.

4. Modelo hidrodinámico mohid studio

4.1. Introducción

La descripción del medio acuático por medio de un sistema de ecuaciones, resulta en particular muy complejo, debido a la no linealidad de las ecuaciones que describen su comportamiento, dado que estas no pueden ser resueltas analíticamente sin estar condicionadas por un contorno no realista y en situaciones simples. Por lo que para obtener la evolución en el tiempo y en el espacio de las propiedades del medio acuático a estudiar es necesario tener algoritmos de resolución, de los que se requiere rapidez y precisión. Lo anterior es posible con base en la discretización del medio continuo, transformando el sistema de ecuaciones diferenciales en un sistema de ecuaciones algebraicas.

En la historia de los modelos, varios han sido propuestos y desarrollados para dar solución a las ecuaciones hidrodinámicas, con lo que la técnica en su mayoría utilizada por estos modelos para la discretización de zonas de estudio es el método de las diferencias finitas y elementos finitos. Para entonces un método menos habitual es introducido por Rizz & Inouye en 1973, utilizado para fluidos tridimensionales (Hirsch, 1988), es el de los volúmenes finitos. Este método se basa en fijar un volumen de control donde se aplicarán de forma macroscópica las leyes de conservación. Frente a las diferencias finitas tiene la ventaja de que este tipo de discretización es conservativo, además del hecho de que el volumen de control se puede adaptar a una malla curva en horizontal. Respecto a los elementos finitos, no precisa de la aplicación de un principio variacional, el cual no es siempre fácil de establecer (Montero, 1999). A continuación se presenta una breve descripción del modelo usado para la consecución de los objetivos planteados en el presente trabajo, no está dentro de los alcances del mismo la exposición completa del modelo, por lo que dentro de la literatura que envuelve al sistema de modelación MOHID, se encuentra una detallada descripción de todos

los módulos que lo conforman (Martins, 1999; Leitão, 2003; Braunschweig, 2004a).

4.2. MOHID Studio

El modelo numérico utilizado en el desarrollo de este trabajo, para representar la hidrodinámica y transporte del sistema lagunar Ciénaga Mallorquín es el MOHID Studio, el cual es una interfaz gráfica de usuario para el Sistema de Modelado de MOHID Agua. Con MOHID Studio se utilizan los Motores numéricos que ofrece MOHID por medio de un entorno fácil de usar, lo que incluye la gestión de todas las tareas necesarias para preparar, ejecutar y analizar los resultados de simulaciones numéricas realizadas por las herramientas numéricas de MOHID.

MOHID Studio es un sistema integrado que permite gestionar y editar los archivos de datos, crear y poner en marcha simulaciones y analizar los resultados del modelo. Por medio de un sistema de información geográfica integrado se pueden visualizar los datos del mapa y los datos de series de tiempo se pueden mostrar en un motor de visualización gráfica también integrado. Un módulo especial permite gestionar los datos de campañas de medición y/o estaciones automáticas. MOHID Studio también ofrece la posibilidad de convertir los datos entre un conjunto de formatos comunes y formatos internos MOHID. Todas las características y capacidades de MOHID Studio se pueden encontrar en la guía de usuario MOHID Studio.

4.3. Sistema de modelación MOHID

El motor numérico MOHID fue desarrollado por investigadores del MARETEC (Centro de Ambiente y Tecnologías Marítimas) perteneciente al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa. MOHID es un sistema de modelación en tres dimensiones de la dinámica de cuerpos de agua como ríos,

estuarios y océanos. Actualmente, MOHID está integrado por diferentes herramientas, como lo son MOHID Water, MOHID Soil y MOHID Land. Estas herramientas pueden ser usadas para estudiar el ciclo del agua en un ambiente integrado, permitiendo simular procesos físicos y biogeoquímicos tanto en el agua como en los sedimentos.

El MOHID ha sido capaz de mostrar su capacidad para la simulación de flujos estuarinos y costeros complejos en distintas aplicaciones realizadas (Coelho *et al.*, 2002; Cancino y Neves, 1999^a; Vaz *et al.*, 2007; Vaz *et al.*, 2009), en relación a lagunas costeras mesomareales, canales mareales y sistemas estuarinos.

4.3.1. MOHID Water

MOHID Water es un programa numérico en tres dimensiones que simula diversos procesos que ocurren en cuerpos de agua como ríos, reservas, estuarios, áreas costeras u océanos. Es uno de los programas principales y de uso para el presente trabajo, dentro del sistema de modelación MOHID. El programa se compone de una serie de módulos que están contruidos sobre las bibliotecas Mohid Base 1 y Mohid Base 2 y que primordialmente se encargan de calcular los procesos físicos y biogeoquímicos y además se encarga del manejo de la lectura y escritura de los datos requeridos por el modelo.

Este programa numérico fue diseñado para simular sistemas acuáticos considerando además los procesos de intercambio con otros medios, como ser la interacción con la atmósfera y con el fondo.

La Figura 3 muestra la interacción entre distintos módulos del sistema, mostrando las relaciones y las interfaces con los diferentes medios.

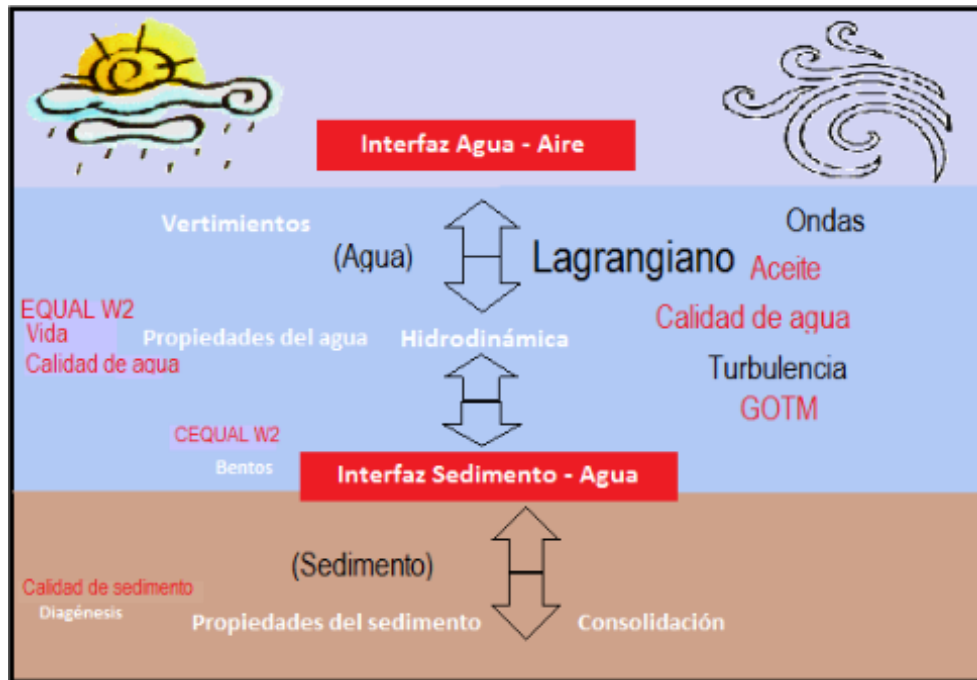


Figura 3. Esquema de MOHID Water: principales módulos involucrados. Elaboración adaptada. Fuente: Barreto *et al* (2009).

4.3.2. Módulo Hidrodinámico MOHID

El módulo hidrodinámico de MOHID, está dado por un modelo de flujo a superficie libre tridimensional baroclínico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes, el cual trabaja con el paradigma de volúmenes finitos (Martins *et al.*, 2001), que resuelve las ecuaciones primitivas incompresibles, suponiendo un equilibrio hidrostático y empleando la aproximación de Boussinesq. Con la implementación del MOHID se pueden realizar simulaciones de áreas costeras y estuarinas que presenten una compleja batimetría y topografía (Braunsweig *et al.*, 2004).

Las ecuaciones de balance de momentum para el flujo de velocidades horizontales medias están expresadas en forma cartesiana (ecuación 3 y 4). Mediante la aproximación de volúmenes finitos se discretiza las ecuaciones, de este modo, la forma discreta de las ecuaciones gobernantes se aplica macroscópicamente al volumen de control (celda), lo que hace que las ecuaciones sean independientes de la geometría de la celda y, por tanto, permite el uso de

una coordenada vertical genérica (Ruiz-Villarreal *et al.*, 2002). La aproximación hidrostática se asume con la ecuación 5, donde g es la gravedad y ρ es la densidad. Actualmente el método de volúmenes finitos es una herramienta ampliamente utilizada para modelar problemas hidrodinámicos de las desembocaduras de ríos y estuarios.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f v = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\partial_z p + g \rho = 0 \quad (5)$$

Donde:

t : tiempo

u, v, w : componentes de los vectores de velocidad en la x, y, z respectivamente

f : parámetro de Coriolis

p : presión

ρ : densidad del agua

g : gravedad

A_H y A_V : viscosidades turbulentas en las direcciones horizontal y vertical

El modelo resuelve las ecuaciones de transporte de salinidad y temperatura y una ecuación de estado para incluir los efectos baroclínicos (ecuación 6, 7 y 8).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(S)}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\partial(wS)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial S}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(T)}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)}{(1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2 - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T + 0.375T^2 + 3S))} \quad (8)$$

Donde:

S y T: son la salinidad y la temperatura

t: tiempo

x, y: coordenadas horizontales

z: coordenada vertical

K_H , K_V : son la horizontal y vertical de la salinidad y difusión de calor

u, v, w: componentes de la velocidad de flujo en los ejes X, Y, Z

4.3.3. Módulo de Transporte MOHID

Los fenómenos de transporte en la columna de agua para una propiedad dada se pueden describir por la ecuación diferencial de advección – difusión – reacción en su forma bidimensional (Kleinsmith y Pearce, 1992; García *et al.*, 2010):

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(uHC)}{\partial x} + \frac{\partial(vHC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + R \quad (9)$$

Donde:

C: concentración promediada en profundidad

H: profundidad

t: tiempo

u, v: componentes de velocidad promediadas en profundidad

D_x, D_y: coeficientes de dispersión horizontal en las direcciones x, y

R: termino de reacción

Esta metodología permite determinar la evolución de la concentración de una sustancia presente o introducida en un medio acuático, teniendo en cuenta la acción conjunta de tres procesos: la advección (o transporte por las corrientes existentes en el medio acuático), la difusión turbulenta o dispersión (que conduce a un esparcimiento de la concentración de la sustancia de interés) y los procesos de transformación (físicos, químicos o biológicos, que actúan en el caso de que una sustancia no sea conservativa) (Koutitas, 1988; Fennel y Neumann, 2004).

El ciclo del oxígeno disuelto dentro del modelo MOHID es llevado a cabo por el módulo de Calidad del Agua MOHID, el cual es un modelo ecológico de dimensión cero, que puede ser utilizado por el transporte de los módulos de Lagrange o euleriano, la ecuación de transporte de oxígeno con bacteria es representada por la ecuación 10.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi^{oxy}}{\partial t} = & (\mu^{phy} \alpha_{O:C}^{photo} + (1 - \beta_{NH_4}^{phy}) \mu^{phy} \alpha_{O:N}^{NO_3} \alpha_{N:C}^{phy} + \mu^{phy} \alpha_{O:P}^{IP} \alpha_{P:C}^{phy} \\
 & - r^{phy} \alpha_{O:C}^{plankton}) \Phi^{phy} \\
 & + (\mu^{dia} \alpha_{O:C}^{photo} + (1 - \beta_{NH_4}^{dia}) \mu^{dia} \alpha_{O:N}^{NO_3} \alpha_{N:C}^{dia} + \mu^{dia} \alpha_{O:P}^{IP} \alpha_{P:C}^{dia} \\
 & - r^{dia} \alpha_{O:C}^{plankton}) \Phi^{dia} \\
 & + r^{cil} \alpha_{O:C}^{cil} \Phi^{cil} + r^{zoo} \alpha_{O:C}^{zoo} \Phi^{zoo} - (\mu_{PON}^{bact} + \mu_{DONnr}^{bact}) \alpha_{O:C}^{OM} \Phi^{bact} - K_{min}^{DONre} \alpha_{O:N}^{min} \Phi^{DONre} \\
 & - K_{dec}^{POP} \alpha_{O:P}^{min} \Phi^{POP} - K_{min}^{DOPre} \alpha_{O:P}^{min} \Phi^{DOPre} - K_{min}^{DOPnr} \alpha_{O:P}^{min} \Phi^{DONnr} - K_{nit}^{oxy} \Phi^{NH_4} + \\
 & K_{dnit}^{oxy} \Phi^{NO_3}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Donde:

Símbolo	Descripción	Unidad	Formulación
$\alpha_{O:N}^{min}$	Consumo de oxígeno en nitrógeno Mineralización	mg O/mg N.d ⁻¹	$\alpha_{O:N}^{min} = \frac{1}{\alpha_{N:C}^{OM}} * \alpha_{O:C}^{CO2} * \frac{\Phi^{oxy}}{0.5 + \Phi^{oxy}}$
$\alpha_{O:P}^{min}$	Consumo de oxígeno en fósforo Mineralización	mg O/mg P.d-	$\alpha_{O:P}^{min} = \frac{1}{\alpha_{P:C}^{OM}} * \alpha_{O:C}^{CO2} * \frac{\Phi^{oxy}}{0.5 + \Phi^{oxy}}$
K_{nit}^{oxy}	Consumo de Oxígeno Cambio de nitrificación	d ⁻¹	$K_{nit}^{oxy} = K_{nit} * \alpha_{O:N}^{NO_3}$
K_{dnit}^{oxy}	Consumo de Oxígeno Tarifa en desnitrificación	d ⁻¹	$K_{dnit}^{oxy} = K_{dnit} * \alpha_{O:N}^{NO_3}$
μ^X	Tasa de crecimiento	[d ⁻¹]	
r^X	Tasa de respiración	[d ⁻¹]	
$\beta_{NH_4}^X$	Factor de preferencia de amoníaco	Adim	
K_{dnit}	Tasa de desnitrificación	[d ⁻¹]	
K_{nit}	Tasa de nitrificación	[d ⁻¹]	
$\alpha_{O:C}^{CO2}$	Relación de oxígeno/carbono en CO2	mgO/mgC	
$\alpha_{N:C}^{OM}$	Relación nitrógeno/carbono en la materia orgánica	mgN/mgC	
$\alpha_{P:C}^{OM}$	Relación fosforo/carbono en materia orgánica	mgP/mgC	
$\alpha_{O:N}^{NO_3}$	Relación de oxígeno / nitrógeno en nitrato	mgO2/mgN	
$\alpha_{O:P}^{IP}$	Relación de oxígeno / nitrógeno en fosforo	mgO2/mgP	
$\alpha_{O:C}^{photo}$	Relación oxígeno fotosíntesis: Carbono	mgO2/mgC	
$\alpha_{O:C}^X$	Relación de oxígeno / carbono en la respiración	mgO/mgC	

4.4. Viscosidad y difusividad turbulenta

El MOHID tiene implementadas varias expresiones para determinar los coeficientes de viscosidad turbulenta. Valores constantes o variables calculados según la formulación de Smagorinsky (Ecuación 11) son las opciones para determinar los coeficientes en la dirección horizontal, siendo k un parámetro de calibración del modelo.

$$v_H = k \cdot dx \cdot dy \cdot \left[\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

Respecto a los coeficientes de viscosidad turbulenta vertical, la forma más simple utilizada en el MOHID es definirlos como constantes. Por otro lado, el modelo permite utilizar formulaciones que dependen del número de Prandtl, de una longitud de mezcla máxima y del número de Richardson o formulaciones que dependen solamente de la estratificación a través del número de Richardson. Por último el MOHID permite calcular la viscosidad vertical modelando las ecuaciones de la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de la turbulencia, a través de la aplicación del modelo tipo k-ε GOTM, que funciona acoplado con el MOHID. El modelo GOTM (General Ocean Turbulence Model) es un modelo de columna de agua unidimensional que permite elegir entre varias parametrizaciones de la mezcla vertical turbulenta.

Los coeficientes horizontales y verticales de difusividad son calculados en el MOHID a partir de los coeficientes de viscosidad turbulenta horizontales y verticales respectivamente. Se considera que la viscosidad y la difusividad se relacionan a través de un factor de proporcionalidad, el Número de Schmidt.

4.5. Condiciones de frontera

Para la resolución del sistema de ecuaciones y la interpretación de los fenómenos de transporte es necesaria la especificación de las condiciones iniciales y de frontera. Además, mediante estas condiciones es por donde procederá el forzamiento del sistema en la mayoría de los casos. Estas condiciones de contorno se pueden proporcionar a la superficie y el fondo del dominio y en los límites laterales y puede ser cerrada, abierta o móvil.

Las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento resueltas por el sistema MOHID, necesitan de condiciones de frontera. Las condiciones de frontera más utilizadas en modelos numéricos aplicados a sistemas costeros son las condiciones de Dirichlet y de Newmann. En el primero, los valores de las variables son impuestos a lo largo de la frontera, mientras que en el segundo son impuestos los gradientes de estas mismas variables. En la columna de agua, cualquier flujo que se dé entre la tierra y el agua, pudiendo ser un río o un efluente, se calcula como una descarga. Las descargas pueden contener propiedades hidrodinámicas (de momento), o propiedades del agua (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, partículas en suspensión, la carga de contaminantes, nutrientes, fitoplancton). Una frontera abierta puede corresponder, por ejemplo, a la frontera oceánica, lo cual permite la imposición de la marea, donde el nivel del agua es impuesto después de ser computada a través de componentes armónicas de la marea. Una visión general de cómo éste tipo de límites se maneja en MOHID agua se puede encontrar en Martins (1999) y Leitão (2003).

5. Descripción de la zona de estudio: la ciénaga mallorquín

5.1. Introducción

La Ciénaga Mallorquín, hace parte del sistema estuarino-marino de las áreas de manglar Mallorquín-Manatíes-Balboa, con geoforma predominante de pantanos de manglar asociados a playones formados por antiguos cordones litorales o por la influencia deltáica del río Magdalena, playas, y ciénagas como ecosistemas estuarinos litorales.

La ciénaga Mallorquín es una laguna costera tropical con características estuarinas (Gutiérrez, 1986), cuyo sustrato predominante es el areno-fangoso, con partes extensas cubiertas de restos de moluscos. Se encuentra rodeada por llanuras de inundación, arenales y dunas y zonas de bosque de manglar. Presenta un clima de bosque muy seco tropical (bms - T) (Viloria, 1989). La ciénaga Mallorquín, se ubica al noreste del departamento del Atlántico, al oeste del río Magdalena (11°05'N - 75°52'W), ocupando actualmente una superficie de 788,70 ha, un perímetro de 28.93 Km y una profundidad máxima de 1,3 m (Figura 4). Hace 50 años formaba parte del delta externo del Río Magdalena, presentando un régimen estuarino caracterizado por abundantes recursos pesqueros y de hábitats (MMA, 1997; En: Universidad del Norte, 2005).

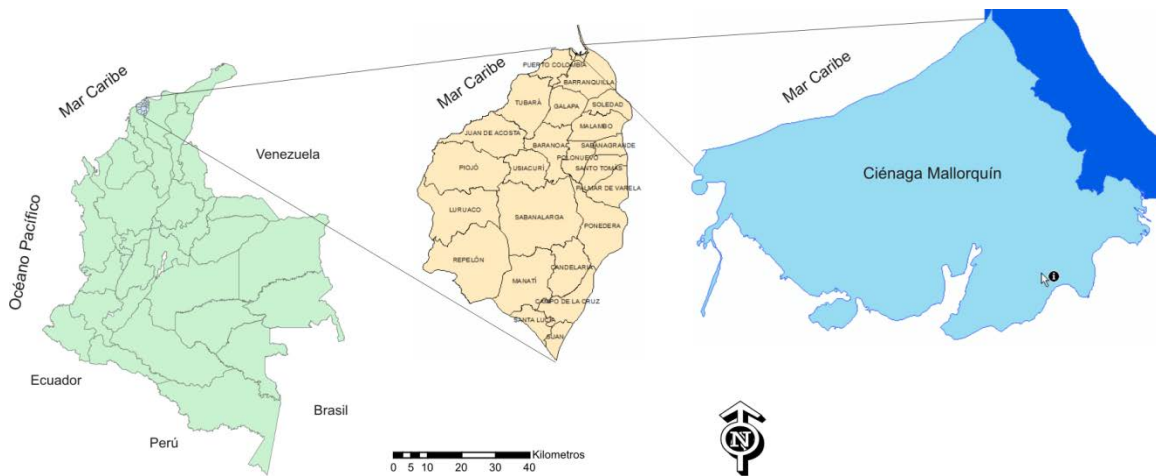


Figura 4. Zona de estudio: Ciénaga Mallorca (11°05'N - 75°52'W)

La Ciénaga Mallorca se formó como parte de la evolución morfodinámica del delta del río Magdalena a principios de siglo, la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza entre 1924 y 1936, cortó el proceso normal de estabilización costera impidiendo la comunicación del río con las ciénagas, a raíz del cambio en el transporte de los sedimentos se conformó un complejo estuarino conformado por las Ciénagas Mallorca, La Playa, Grande y San Nicolás (Fortuol, 1991 En: Universidad del Norte, 2005). Dado el avance del proceso de erosión y la ausencia de agua dulce en la ciénaga, en los últimos años se ha comportado como una laguna costera, que recibe aportes de agua del Arroyo León, del Río Magdalena, de infiltración y la precipitación directa.

5.2. Meteorología de la Ciénaga Mallorca

El clima general de la costa caribe del país es clasificado por CIOH (1998) como tropical semiárido debido a la interacción de varios factores involucrados, tales como la Zona de Convergencia Intertropical (CIT), los vientos Alisios, el paso de las ondas del Este y la presencia de frentes fríos del hemisferio Norte. Por otra parte, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC. 1994), agrega otros factores como la latitud de ubicación del territorio, la altura del territorio sobre el nivel del

mar, el relieve que define el modelado del territorio y, finalmente, la cercanía a la línea de costa. Para el caso de la ciénaga Mallorquín su climatología se ve fuertemente influenciada por los siguientes factores:

- El movimiento de la CIT genera desplazamientos de masas de aire húmedas marinas y continentales propiciando condiciones de clima de tipo ciclónico alternas (lluvia - seco - nubosidad); de acuerdo con CIOH (1998) es el principal regulador del clima en la región.
- Los vientos Alisios se originan en los centros de alta presión del norte y del noreste e inciden con mayor intensidad entre diciembre y marzo, generando un tiempo anticiclónico (sol – cielo despejado – escasas lluvias).
- Las ondas tropicales del Este avanzan de este a oeste junto a los Alisios, causando vientos, nubosidad y precipitaciones entre junio y noviembre, y creando condiciones para formación de huracanes.
- Los frentes fríos dan lugar a vientos y a trenes de olas sobre las costas que resultan en marejadas en enero y abril (CIOH, 1998) y, excepcionalmente, en el mes de diciembre.
- La latitud, según IGAC (1994), es determinante por cuanto define la cantidad de luz y de calor que se recibe y homogeniza la duración de los días y las noches y, aunque señala que queda fuera de la influencia directa de la CIT, coincide con CIOH (1998) al destacar su influencia en la distribución de las lluvias y en la recepción de gran cantidad de brillo solar.
- La altitud, en el caso de Mallorquín y su cuenca, no es significativa su influencia ya que las diferencias altitudinales no son mayores y las mayores alturas apenas superan los 300 metros en las lomas de Tubará y de Santa Rosa, al sur de la cuenca.
- El relieve. Su orientación y magnitud en combinación con los vientos alisios incide en la cantidad de lluvias y la humedad del aire, observándose que aunque baja la altimetría contribuye en parte al incremento de lluvias en el sur del departamento (IGAC, 1994, en HIDROESTUDIOS & CONCEP, 1998).

- La cercanía al mar es fundamental por su papel moderador de las temperaturas en las zonas cercanas a la línea de costa (IGAC, 1994); las brisas de mar y tierra retiran las masas húmedas de la costa imprimiéndole un carácter más seco y haciendo que las descargas de lluvia se produzcan tierra adentro, específicamente al sur de la cuenca.

Los vientos según CIOH (1998), en la zona costera del Caribe colombiano están sometidos al régimen constante de los vientos alisios provenientes del N y del NE, teniendo una actividad constante durante los meses de diciembre a abril, siendo variables durante el resto del año en relación a dirección y fuerza (Figura 5).

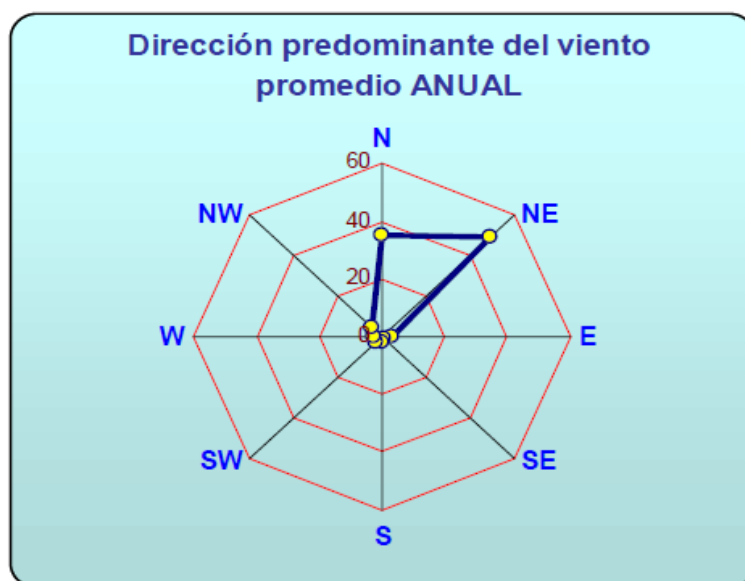


Figura 5. Dirección del Viento Promedio Anual. Fuente: CRA con información de Universidad del Norte, 2005

La precipitación promedio anual (Figura 6) en el departamento oscila entre 650 y 1100mm; los meses de menor lluvia se presentan entre diciembre y abril y los de mayor precipitación de mayo a noviembre. El número de días de lluvia es muy escaso, presentándose una alta lluvia en corto tiempo, lo cual indica que la precipitación llega a ser torrencial y fuertemente erosiva cuando se presenta (Ecoforest Ltda., 1996). La influencia de los vientos alisios que se presentan en el primer semestre del año es notoria dado que arrastran las masas húmedas hacia

el continente, lejos de la zona costera, creando un tiempo seco con brisa y sin nubosidades (CRA).

La temperatura media anual (Figura 7) es constante en toda la cuenca de la Ciénaga Mallorquín, por lo que varían entre 27,5 °C sobre la franja costera y 27,7 °C hacia el sur de la cuenca según lo expresado por HIDROESTUDIOS & CONCEP (1998), en donde describen el parámetro como “...un régimen de temperaturas isotérmico, con temperaturas que son reguladas por la circulación de los vientos, manifestados en brisas mar – tierra, fenómeno que se manifiesta de manera pronunciada hacia la franja cercana al litoral.”

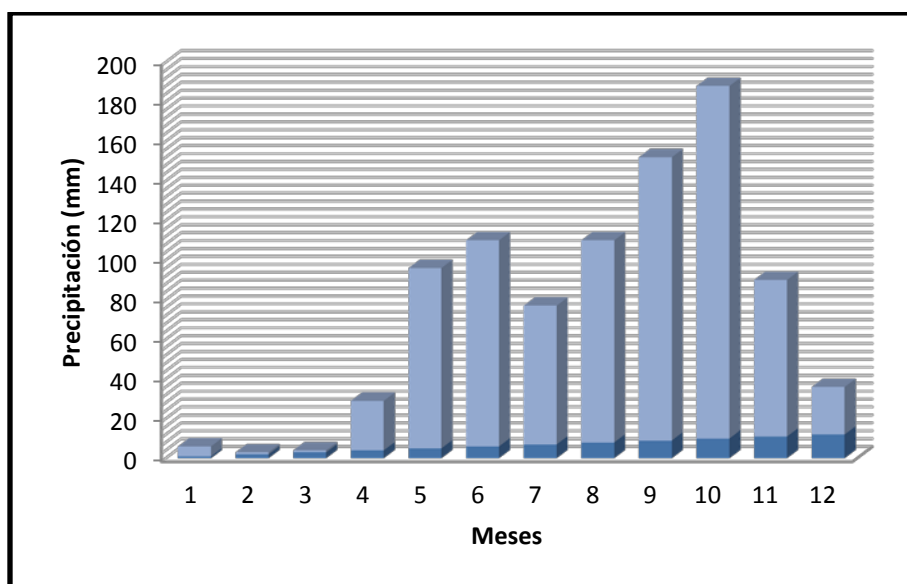


Figura 6. Promedio multianual de precipitación. Fuente: Elaboración propia con datos del CIOH (2010)

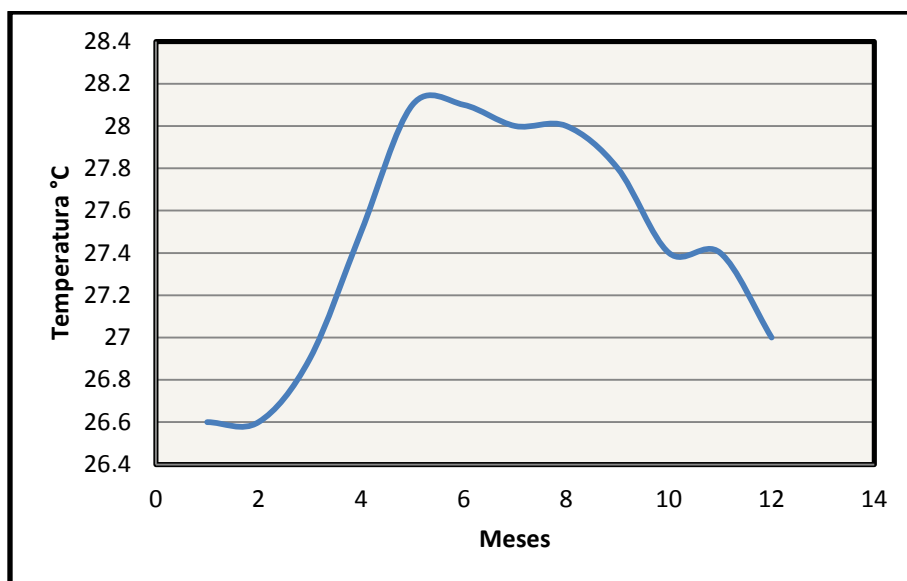


Figura 7. Temperatura Media – Promedio Multianual. Fuente: Elaboración propia con datos del CIOH (2010)

5.3. Aportes de aguas continentales

Los aportes a la Ciénaga Mallorquín con aguas continentales (Figura 8) está dado por el arroyo León; el arroyo está caracterizado por presentar volúmenes considerables de agua especialmente durante períodos de lluvia (Galvis et al., 1989; Universidad del Norte, 1993; CRA, 1995; CORMAGDALENA, CRA, 1998; Sociedad Portuaria Bocas de Ceniza, 1998), con caudales estimados en 4,9 m³/s, durante la época de lluvias y 0,2 m³/s para la época de secas.

Otro afluente que aporta aguas a la Ciénaga es el río Magdalena, a partir de una conexión artificial que se da desde 1992, a través de unos tubos instalados a lo largo del Tajamar occidental, lo que ha permitido compensar las pérdidas por evaporación y evitar que la ciénaga no pierda tanto en su profundidad, además permitió en la fecha de instalación de los tubos conectores, que se prolongue el tiempo en que permanecía abierta la conexión ciénaga - mar, con un evidente beneficio para la calidad ambiental de todo el sistema. La colocación de tubos es reportada por Universidad del Norte & INDERENA (1993), señalando que a comienzos de 1992 se instalaron 5 tubos de Ø = 12" bajo el tajamar occidental con

el propósito de introducir agua del río Magdalena al sistema de la ciénaga, Universidad del Norte & INDERENA (1993), midió para las 5 estructuras un caudal de entrada entre 0,7 y 1,35 m³/s, estimando un caudal promedio de 1,0 m³/s.



Figura 8. Ubicación de los afluentes (puntos rojos) de aguas continentales en la Ciénaga Mallorcaín

5.4. Hidrografía de la Ciénaga Mallorcaín

Las lagunas costeras como la ciénaga Mallorcaín, son un atributo exclusivo del litoral Caribe, son masas de aguas tranquila, poco profundas, que se separan del mar por una barra que impide la acción del oleaje, y se unen con el mar a través de canales angostos, reciben agua y sedimentos de las corrientes de agua dulce y marina, estas brindan importantes servicios ambientales como la regulación de desequilibrios y perturbaciones, reciclaje de nutrientes y hábitats de refugio de diversos organismos. Dichos ecosistemas por su belleza paisajística y condiciones naturales son y podrían ser utilizados además como centros de recreación y esparcimiento (Conde *et al.*, 2002; INVEMAR, 2002).

Las causas principales que generan la circulación del agua dentro de la Ciénaga Mallorcaín, están sujeta a las condiciones meteorológicas y del entorno de la ciénaga, siendo los siguientes: la marea, cuando se da la interacción ciénaga –

mar, las condiciones meteorológicas que se presentan de acuerdo a la época climática y los aportes de aguas continentales representados por los caudales entrantes del río Magdalena y Arroyo León.

5.5. Condiciones hidrodinámicas del mar adyacente a la Ciénaga Mallorquín

El ambiente costero es muy dinámico y los procesos hidrodinámicos, condicionados por factores climáticos, movimientos de la corteza y cambios en la distribución de los niveles oceánicos, conducen a perturbaciones que se evidencian en los cambios morfológicos en las costas. Esta configuración multicausal conduce a ambientes inestables, ya sean de erosión o de acreción.

Las zonas costeras se describen como el área litoral que incluye las dunas costeras y la topografía del fondo hasta profundidades que se verán afectada por la acción del oleaje. Las costas son altamente dinámicas y evolucionan sus características morfológicas de forma continua como consecuencia de las condiciones cambiantes del mar. El estado dinámico de la costa tiene como origen la concentración de la energía del oleaje en una zona relativamente estrecha, permitiendo la interacción de la energía del oleaje en función de su altura que se transforma en energía turbulenta, la que posteriormente se disipa.

El litoral Caribe presenta un régimen de mareas cuya fluctuación es próxima a los 40 centímetros, a diferencia del litoral Pacífico, donde la marea es cercana a los 4 metros.

Los fenómenos como el oleaje, mareas, corrientes marinas, junto con los agentes climáticos, ejercen una importante influencia en la dinámica costera comprendida entre el tajamar occidental del Río Magdalena y la Flecha de Galerazamba (invemar, 1990), generando inestabilidad en esta zona de la franja litoral, permitiendo que se den cambios importantes en cortos periodos de tiempo, evidenciados por medio de fenómenos de erosión y acrecimiento sedimentario.

Partiendo de lo anterior, en el tramo entre la Ciénaga Mallorcaín y Punta Sabanilla se aprecia una dirección preferencial aproximadamente este oeste (Figura 9), con dominio de geoformas vinculadas a costas bajas, limitadas por una barra que se desprende del tajamar occidental y se proyecta en dirección sur-oeste en una longitud de 8 km hasta Punta Sabanilla (invemar 1999).

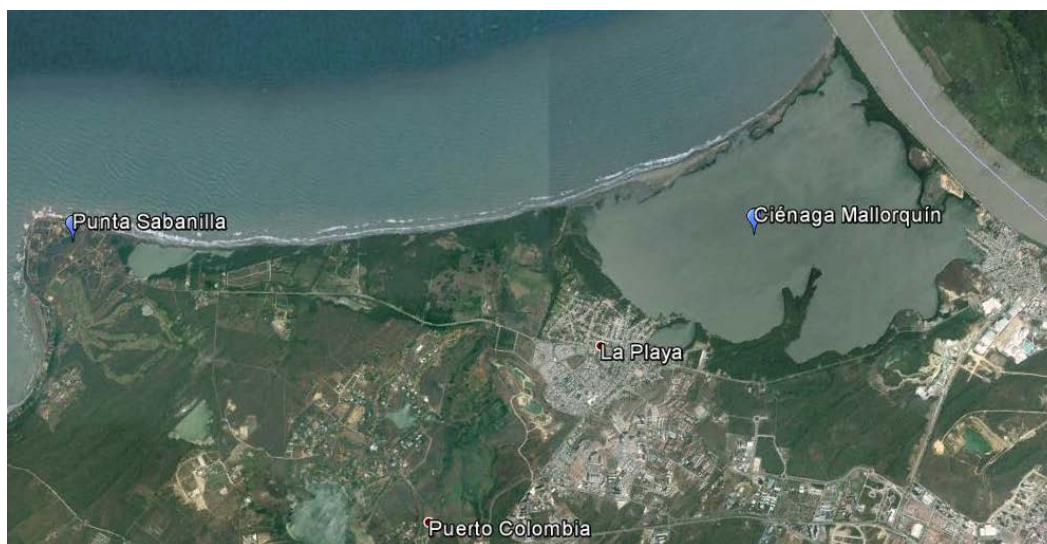


Figura 9. Ubicación Punta Sabanilla (Imagen tomada de Google Earth, 11°2'38.80"N, 74°55'6.49"O)

La barra que separa la Ciénaga Mallorcaín con el mar Caribe es relativamente angosta, con amplitudes mínimas en su parte central de 80 m. las conexiones con el mar en épocas de tormenta y mares de leva, la hacen susceptible a la invasión del mar como resultado del fuerte oleaje.

En las playas se puede presentar procesos de erosión y acreción que eventualmente se genera la formación y desaparición de uno o más elementos fisiográficos, pudiendo ser estos pequeños e irrelevantes o ser grandes y representar un problema importante.

Los procesos físicos que afectan y modifican la estructura de la zona costera se muestran en la Figura 10, con lo cual se deja claro que la protección y mantenimiento de la zona de playa pasa por el entendimiento y conocimiento de

los procesos físicos en la zona costera. Entre estos procesos están los problemas hidrodinámicos más complejos de representar por medio de modelos y en consecuencia de pronosticar, como el oleaje, corrientes, distribución espacial de energía del oleaje, etc.

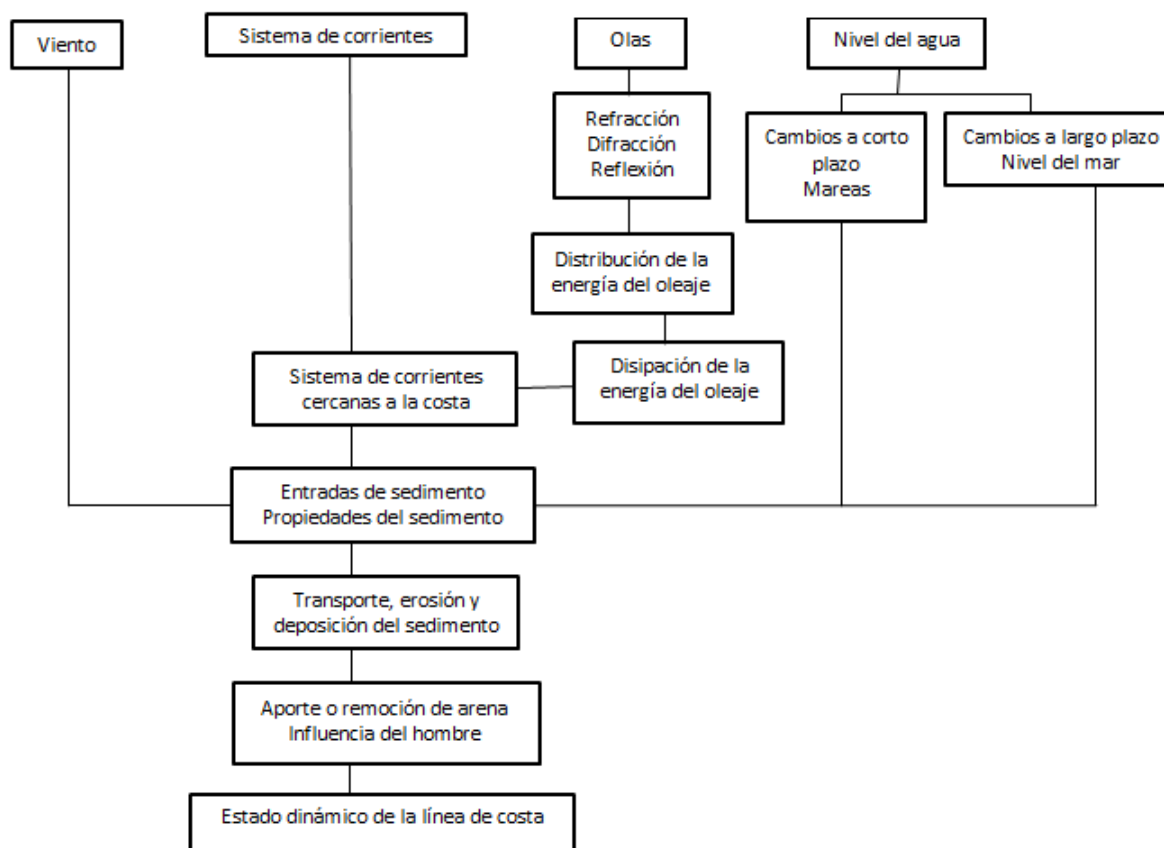


Figura 10. Factores involucrados en los procesos costeros

5.5.1. Caracterización de la marea

En general el litoral Caribe presenta un régimen de mareas semi diurna (Figura 2), de tipo micro mareal, con pleamares de intervalo de oscilación entre 10 y 14 horas, con mayor frecuencia cada 11,5 horas especialmente para la zona central (IDEAM, 2001b). Para el caso del Caribe, la penetración de las mareas, normalmente no pasa de 60 cm de altura (Figura 11). Las mareas juegan un papel

importante para el flujo y reflujo en las entradas de agua a las lagunas costeras. Las tensiones de fondo de la marea son las de mayor importancia para los procesos de erosión del fondo (intensidad de re-suspensión de las partículas de sedimento). La circulación residual de la marea, es uno de los principales mecanismos del transporte de los sólidos en las escalas mayores del período de la marea en las zonas donde las mareas son pronunciadas (Lonin, 2002).

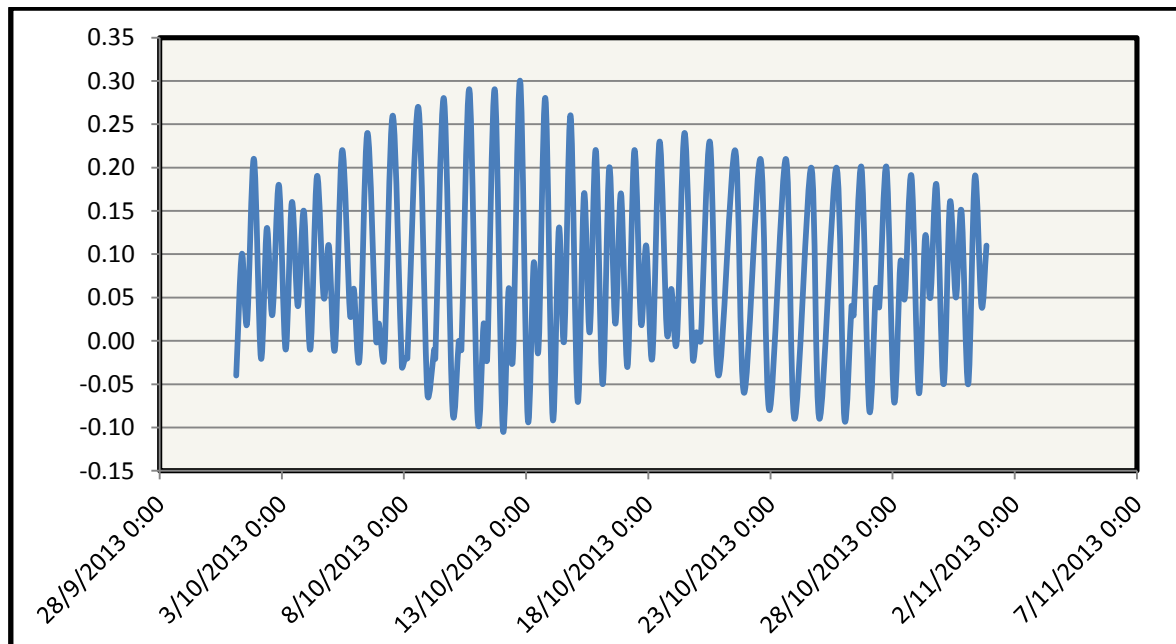


Figura 11. Niveles del mar en épocas de lluvia (Octubre 2013). Fuente: HYDRAS 3, IDEAM.

5.5.2. Oleaje

Las olas son movimientos ondulatorios de la superficie del mar, generados por la acción de los vientos, su altura depende de la intensidad de los vientos; su dirección está asociada a las épocas climáticas y a los cambios batimétricos de las zonas cercanas a la línea de costa.

En el Caribe se observan una dirección del oleaje N-NE para la época seca, mientras que en la época de transición y húmeda la dirección es variable entre NE y SW. En la zona comprendida entre Bocas de Cenizas y Punta Caribana (Figura 12), el oleaje presenta una dirección norte-sur y con alturas de 0,6 a 1 m, un

intervalo de período de oleaje entre 4 y 8 segundos, correspondiendo los valores máximos a la época seca, aunque en eventos extremos se presentan alturas de hasta 3,5 - 5 m, incidiendo directamente sobre las geoformas presentes, produciendo erosión.

La rotura del oleaje genera unas corrientes, fundamentalmente paralelas a la playa, la cual está en función del ángulo con el que el oleaje aborda a la costa y su altura de ola. Estas corrientes, denominadas corrientes longitudinales, son de especial importancia en la disposición de equilibrio de una playa, dado su importancia en el transporte de arena (sedimentos en suspensión).

5.5.3. Corrientes

Las corrientes superficiales observadas en las capas superiores de los océanos son debidas principalmente a la acción de la circulación atmosférica sobre la superficie del mar (IDEAM, 2001b).

En la costa norte de la cuenca de Colombia, las corrientes superficiales están dominadas por la corriente Caribe; la costa suroeste por ser una cuenca semi cerrada presenta una circulación más compleja y aparentemente está dominada por la circulación de giros ciclónicos como el de Panamá-Colombia y la contracorriente del Darién (Andrade, 1993 En: INVEMAR, 2003) (Figura 12). En la Región Caribe de Colombia, las temperaturas del agua superficial fluctúan entre 28°C y 30° C y alrededor de 17,8°C a 100 m. de profundidad, reflejo de la estratificación característica de los mares tropicales cálidos. Los movimientos de las masas de agua se caracterizan por la corriente del Caribe de dirección noroeste y la contracorriente de Panamá, de dirección noreste. Cuando la Zona de Confluencia Intertropical, ZCIT, está en posición meridional, época seca, la corriente del Caribe se acerca más a la costa y la contracorriente de Panamá, solo se observa en la zona sur hacia el Golfo de Urabá. Durante la época húmeda la corriente del Caribe se mueve hacia el norte y se aleja de la costa, de tal forma que la contracorriente de Panamá extiende la influencia hacia la desembocadura

del río Magdalena y un poco más al nordeste. Frente a la desembocadura del río Magdalena el patrón de corriente es casi el mismo durante todo el año (Andrade, 1993 En: INVEMAR, 2003).

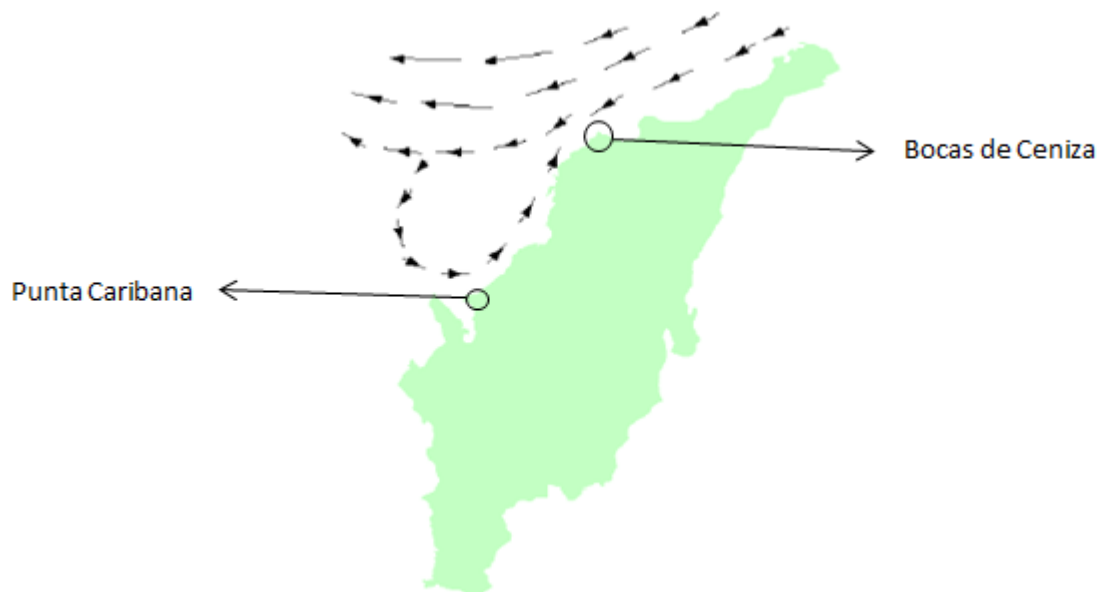


Figura 12. Dirección de las corrientes del Caribe

5.6. Circulación de la salinidad y temperatura

En la ciénaga la temperatura del agua está condicionada a su ubicación costera y las condiciones climáticas predominantes de la zona. En general la temperatura permanece constante en la mayor parte del espejo de agua, entre 26 y 29°C (MinAmbiente, 1997).

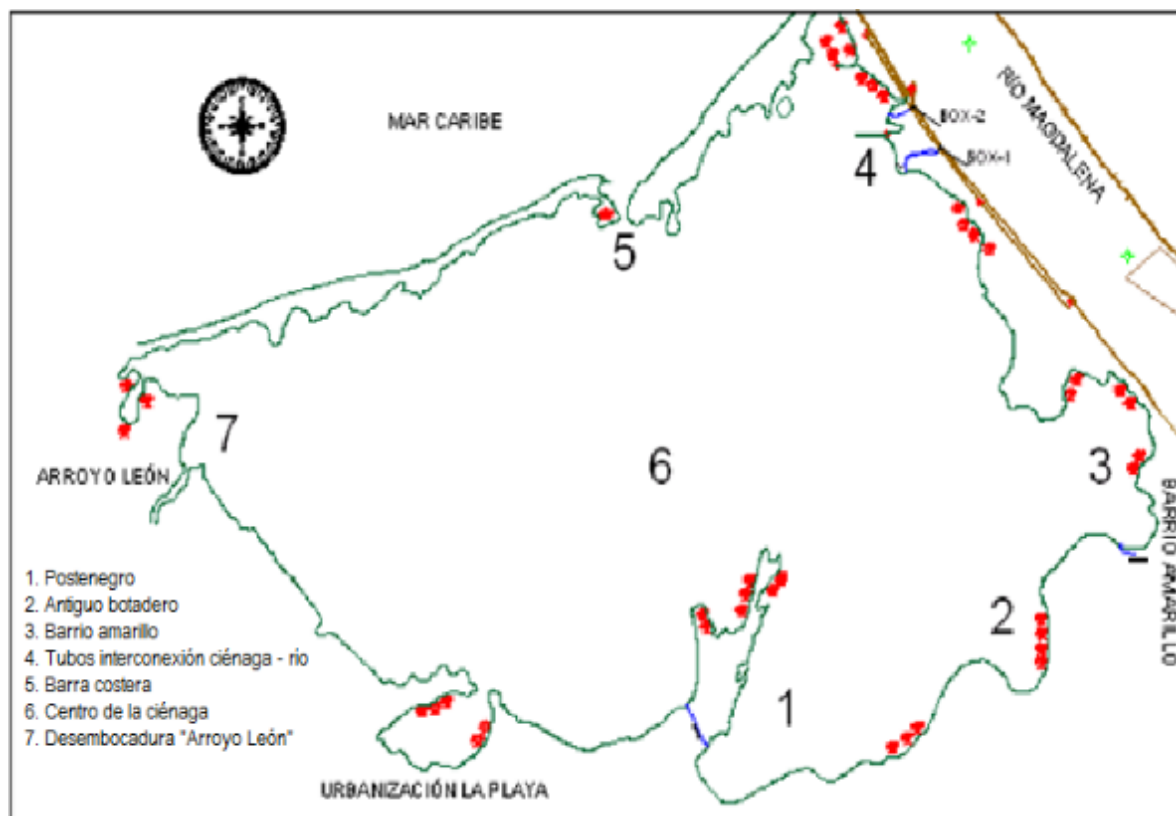


Figura 13. Ubicación de los puntos de muestreo en la Ciénaga Mallorquín, Fuente: Tomado de la universidad del Norte (2005)

En la ciénaga la temperatura del agua está relacionada con su ubicación costera y las condiciones climáticas predominantes. En términos generales, permanece constante en la mayor parte del espejo de agua, entre 26 y 29°C (MinAmbiente, 1997). Los resultados de los estudios realizados por la Universidad del Norte (2005), muestran valores de entre 29 y 32°C, aunque ocasionalmente arrojó valores mínimos y máximos puntuales de 26°C y 34°C, que son acordes con las condiciones ambientales promedio, aunque superan los 27°C en la superficie, recomendados para una óptima producción íctica. Los valores más altos se registraron en las zonas cercanas a las comunidades (barrio amarillo) y a los tubos de interconexión con el río Magdalena (Figura 13), pudiendo tener relación con la contaminación reflejada en esas zonas.

En comparación con otras mediciones se aprecia que las condiciones de la zona no se han modificado substancialmente por lo que la temperatura del espejo de agua en la ciénaga no ha sido significativamente alterada.

Fortoul (1991) presenta la distribución espacial de los valores de temperatura para el área correspondiente a la ciénaga. Puede observarse en ese estudio que la temperatura alcanza valores mínimos de 28°C en la zona central, aumentando gradualmente hacia las orillas (Figura 14). Daza y Arciniegas (2002) reporta el mismo patrón, con temperaturas más altas en la zona del Barrio Las Flores y el punto de descarga de las aguas servidas del Corregimiento La Playa. En igual medida en caracterizaciones llevadas a cabo por la Corporación autónoma regional (CRA) en la Ciénaga Mallorquín (CRA, 2012) se establecen perfiles para la temperatura, acordes con los resultados obtenidos en anteriores estudios, coincidiendo en que los picos altos de temperatura se presentan en mayor medida en las zonas cercanas a la comunidad y en la franja de agua cercana a la interconexión del Río Magdalena con la Ciénaga Mallorquín.

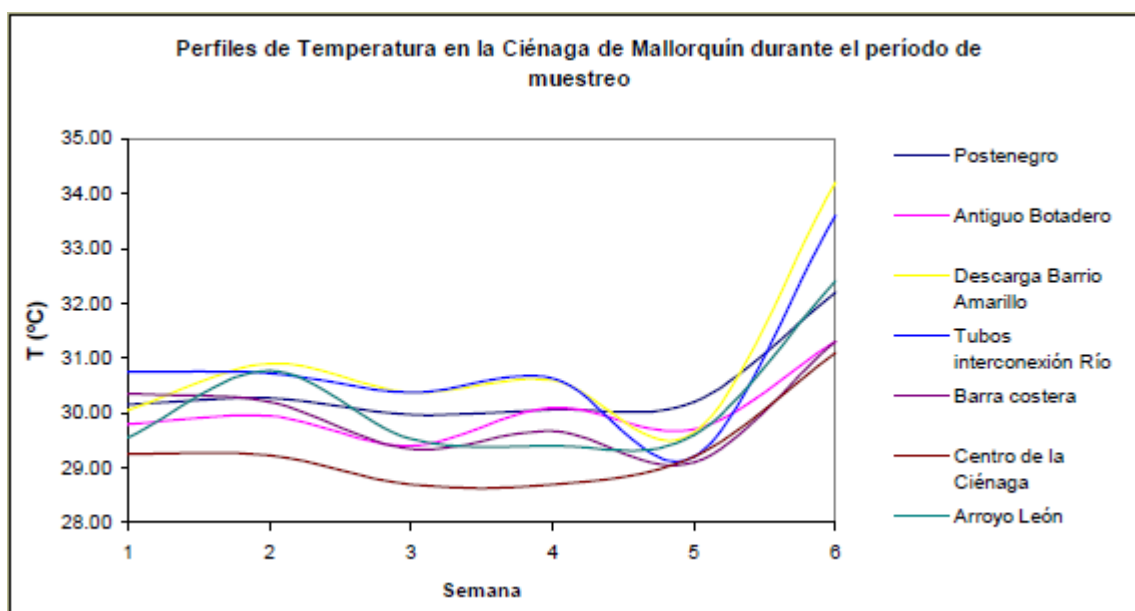


Figura 14. Perfiles de temperatura en la Ciénaga Mallorquín. Fuente: universidad del Norte (2005); POMCA (2006).

Los niveles de salinidad en la ciénaga disminuyen en la medida que se aleja del punto de contacto con el mar y cuando llega la época de lluvias. Según MinAmbiente (1997), salinidades entre 10 y 35 ppmil favorecen el desarrollo de buena parte de las especies características, incluyendo la fauna íctica; en Mallorquín, las condiciones se ubican entre 17 y 37 ppmil con los valores más bajos ubicados en las cercanías del Arroyo León y los valores máximos en la barra costera y el centro de la Ciénaga (POMCA Ciénaga Mallorquín, 2006).

Anteriormente, ante la inexistencia de la entrada de agua proveniente del río Magdalena, cuando no se presentaba la conexión ciénaga – mar, la ciénaga estaba sujeta a periodos de alta salinidad llegando a la mortandad de las especies nativas, o muy baja si había presencia de lluvias. Fortoul (1991) reporta para la época de máximas lluvias picos cercanos a 30 ppmil en cercanías a la barra, disminuyendo rápidamente hacia el centro de la laguna hasta valores de 10 ppmil. Con la colocación de los tubos en el tajamar en 1992, se ha aumentado la permanencia de la barra abierta, dando lugar a valores uniformes de salinidad en la mayor parte de la laguna; Daza y Arciniegas (2002) encontraron valores entre 15 y 35 ppmil, con máximos en cercanías al mar caribe y mínimos en las zonas de inserción de recursos dulceacuícolas (entre 15 y 25 ppmil en el Arroyo León y alrededor de 28 ppmil en la inserción del Río Magdalena)

El Oxígeno disuelto (OD) es un parámetro fundamental para determinar la calidad ambiental en un cuerpo de agua, está condicionado por la temperatura o salinidad, teniendo en cuenta que a mayor nivel de estos parámetros la concentración de OD se reduce. Los niveles de OD encontrados presentaron un valor medio central de 5,89 mg/L, observándose los valores más elevados en los puntos 2 y 7 (Figura 15). No obstante las concentraciones de OD registradas, son comunes de encontrar durante el ciclo diario en este tipo de sistema acuático, debido en mayor proporción al aporte de tipo físico ocasionado por la fuerte y continua circulación atmosférica, las cuales causan la aireación de la capa superficial de la masa de agua, permitiendo que se den los procesos de reaireación. Con lo que se puede sostener que los procesos de aireación de la ciénaga en épocas de secas y aún más condicionada cuando no está conectada al mar Caribe, se ve dominada por el

efecto del viento en la zona, por lo que los valores de OD se puede subir hasta 9 mg O₂/L en la barra costera, mientras que en temporada de lluvias y/o con velocidades bajas o moderadas, las concentraciones pueden descender hasta el rango entre 5 y 6 mg O₂/L (INVEMAR, 2001, y Anaya y Asociados, 1995, en U del Norte, 2005) (POMCA, 2006).

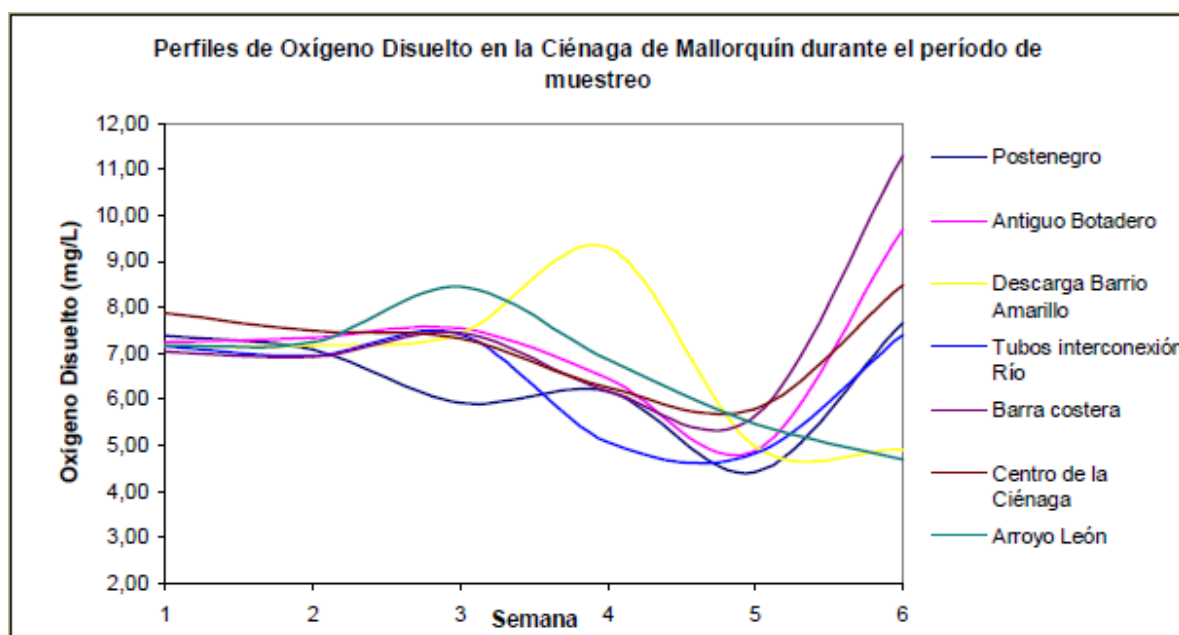


Figura 15. Perfiles de Oxígeno Disuelto en la Ciénaga Mallorquín. Fuente: universidad del Norte (2005); POMCA (2006).

5.7. Conexión Ciénaga Mallorquín – Mar Caribe

La franja de arena que separa la Ciénaga de Mallorquín con el mar Caribe está dada por playas altamente erosivas. Dichos fenómenos erosivos en esta zona costera se han visto magnificados a partir de la construcción del tajamar occidental (que encausa la desembocadura del Río Magdalena en el mar Caribe), el cual cortó el proceso natural de transporte de sedimentos proveniente del Río Magdalena produciendo importantes alteraciones en la morfología y amplitud de la barra arenosa que individualiza la Ciénaga de Mallorquín, presentando grandes retrocesos de la barra de arena, del orden de 600 m en los últimos 10 años (Figura

16), aparte de la reducida amplitud aproximada de 80 m en su parte central y poca altura (1 m) permiten que la ciénaga sea altamente vulnerable a la acción mecánica del oleaje, principalmente en períodos de vientos (POMCA, 2006).

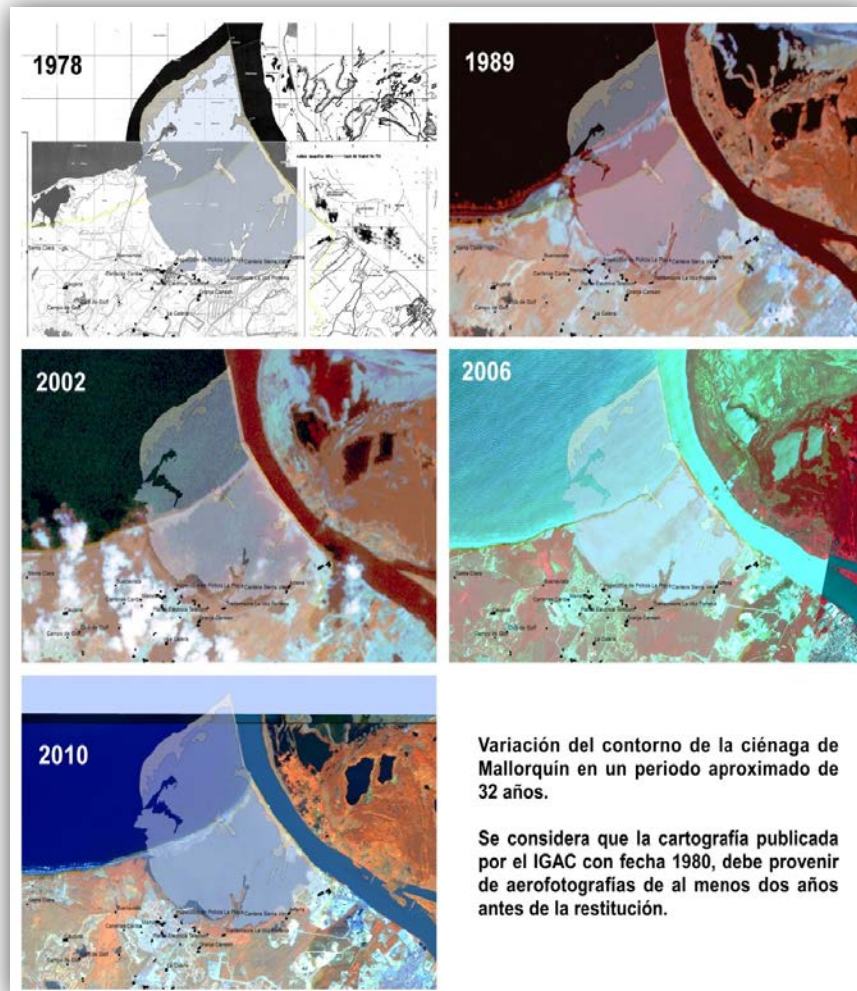


Figura 16. Variación Multitemporal de la Ciénaga Mallorquín. Fuente: "Ejecución de acciones para la implementación del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica de la ciénaga de Mallorquín Convenio 006 de 2010". Pág. 306.

La ubicación de la apertura (boca) que comunica a la ciénaga Mallorquín con el mar Caribe es hacia las zonas de mayor pendiente de la playa y está sujeta a que se presenten algunas condiciones para que dicho proceso se dé, permaneciendo cerrada en algunos casos como en el año 1986, algo incipiente en el 1989, y para años 2000-2001 vuelve a permanecer cerrada, se abre nuevamente en el año

2002. Para las zonas donde la pendiente es pronunciada no existe boca. La conexión ciénaga - mar se puede dar a partir de los aportes del arroyo León en época de lluvias, los flujos subterráneos y por precipitación sobre el espejo de agua lo que propicia un aumento en el nivel del agua, produciendo una cabeza hidrostática (POMCA, 2005) con la energía suficiente para romper la barra y provocar el vaciado hacia el mar de estos volúmenes extras. En la Figura 17 se observa como la boca puede formarse en diferentes sectores a lo largo de la barra de arena, dependiendo de que se presenten algunas de las condiciones anteriormente expuestas. Esto genera que la dinámica existente entre ciénaga y el mar no presenten patrones a lo largo del tiempo, dado que dicha conexión al poder darse en determinadas zonas repercute de diferentes formas en la circulación de la Ciénaga Mallorquín.



Figura 17. Conexiones ciénaga - mar (Boca). Imágenes de Google Earth

La barra que separa la Ciénaga Mallorquín del mar, es relativamente angosta, como se ha dicho presenta retrocesos en su línea de costa, como consecuencia

del transporte dinámico de los sedimentos en el litoral generalizado en la costa al sur de la desembocadura del Río Magdalena. De igual forma la conexión ciénaga – mar se puede explicar como está establecido en el POMCA de la Ciénaga Mallorquín: “Con el tiempo, el nivel del agua en la Ciénaga tiende a estabilizarse en el nivel medio del mar, con lo cual el volumen de agua que sale de la Ciénaga en un ciclo de mareas se hace igual al que entra (considerando únicamente las corrientes de marea). Cuando las condiciones de oleajes son tales que producen un transporte de sedimentos intensos y las mareas son débiles, la boca se cierra hasta que se produzca nuevamente las condiciones para repetir el ciclo” (Universidad del Norte & INDERENA, 1993). De acuerdo con las observaciones de campo realizadas por entes ambientales como la Corporación Autónoma Regional del Atlántico, Cormagdalena y el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente Barranquilla (DAMAB), para la elaboración del POMCA de la cuenca de Mallorquín, el día 25 de febrero/2005, establecieron que en los últimos años la boca ha permanecido abierta y sólo en veranos excepcionales se ha cerrado por completo. Además, el día de la visita a la ciénaga por parte del DAMAB, la boca tenía una anchura de unos 110 metros, aunque no se logró establecer una profundidad media.

5.8. Clasificación costera de la Ciénaga Mallorquín

Las lagunas costeras son convenientemente caracterizadas de acuerdo a la cantidad de agua intercambiada con la zona costera adyacente y también con la intensidad del flujo de acción en su interior. Además están dinámicamente relacionados con las condiciones de los canales y aberturas del océano. Por lo tanto, las lagunas se subdividen en tres tipos: ahogados, restringidas y de yeso o abierta. Se presentan una serie de eventos secuenciales de variación histórica del nivel del mar como el principal factor del origen de las lagunas costeras (Farreras, 2004):

- Estabilización del nivel de la línea de costa en el Pleistoceno (hace 80,000 años), a aproximadamente 5 a 8 metros sobre el actual, formándose un arrecife, cantil o bordo elevado de depósitos de playa que aún existe actualmente rodeando algunas lagunas costeras y bahías.
- Descenso del nivel del mar en el Holoceno (hace 18,000 años) por la glaciación de Wisconsin (transgresión Flandriana), a razón de un metro cada 100 años, y hasta 130 metros bajo el actual, durante el cual los procesos terrestres y atmosféricos erosionaron valles y cañones formando deltas y planicies costeras.
- Rápido ascenso (regresión) del nivel del mar a fines del Holoceno (hasta hace 5000 años atrás de hoy), hasta 3 o 4 metros bajo el actual nivel, durante el cual el agua de mar inunda las planicies y los valles previamente excavados por los ríos y glaciares descendentes. La turbulencia litoral y el oleaje retrabajan los sedimentos costeros, cubren con una capa de arena la plataforma, y forman playas en la línea de costa.
- Desaceleración de la regresión anterior (desde hace 5,000 años atrás hasta hoy), en que el nivel del mar sube lentamente (2 milímetros cada año). Los nuevos ríos que ocupan las partes altas de los antiguos valles, transportan sedimentos, forman deltas progresivos en la costa y construyen barras en las bocas de las lagunas costeras.

Revisando la historia de la Ciénaga Mallorquín, ésta ha sufrido cambios importantes que han alterado su estructura dinámica y ecosistémica, como se ha mencionado, hace 50 años formaba parte del delta externo del Río Magdalena, presentando un régimen estuarino como característica principal, a partir de la construcción del tajarar occidental del río Magdalena adopta una característica predominante de laguna costera no estuarina, con elevados niveles de salinidad, viéndose agravados cuando no se daba la conexión con el mar Caribe, por el impedimento de la recirculación del agua, ante esta situación son instalados por parte de la comunidad unos tubos permitiendo el aporte de agua del río Magdalena, con lo que sigue siendo laguna costera con características estuarinas (Gutiérrez, 1986).

Se puede decir que las lagunas costeras son fenómenos de origen geológico reciente y de vida corta, existiendo en permanente transformación debido a la erosión y depósito de sedimentos y por fluctuaciones del nivel del mar de carácter eustático (debidos a cambios del volumen de agua del océano) e isostáticos (debidos a cambios del nivel de la tierra) (Farreras, 2004). Agentes dominantes de la circulación en lagunas costeras como los AAC y el accionar de las mareas no se establecen como una constante, por lo que las lagunas costeras como la Ciénaga Mallorquín nunca logran alcanzar un estado de equilibrio definitivo, permitiendo que sistemas complejos de vida efímera, en permanente interacción y modificación, y fácilmente afectables por acciones externas.

5.9. Campaña de medición y muestreo

Una serie de datos que el modelo requiere como condiciones iniciales y para efectos de calibración y validación de las simulaciones, son las mediciones de los principales parámetros, en especial los de interés, los cuales fueron llevados a cabo para la realización de diferentes estudios ambientales, relacionados con la Ciénaga Mallorquín. Para la adaptación y calibración del modelo se tomaron los datos necesarios de dichos estudios realizados por la CRA (2012). Los sitios de medición y muestreo se presentan en la Figura 18.



Figura 18. Ubicación de los puntos de medición y muestreo (imagen de fondo tomada de Google Earth)

Las coordenadas de la ubicación exacta de cada punto de muestreo se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo

Punto	Coordenadas	
1	11°02'42.4"N	74°52'02.8"W
2	10°03'07.5"N	74°50'58.4"W
3	10°02'37.8"N	74°51'08.4"W
4	11° 02'21.2"N	74°51'30.5"W
5	11° 02'12.8"N	74°50'33.4"W
6	11° 02'23.2"N	74°50'03.1"W
7	11° 03'11.6"N	74°50'28.0"W

Se presentan a continuación (Figura 19) los resultados de las mediciones realizadas para la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, los cuales son los parámetros de interés de la presente investigación.

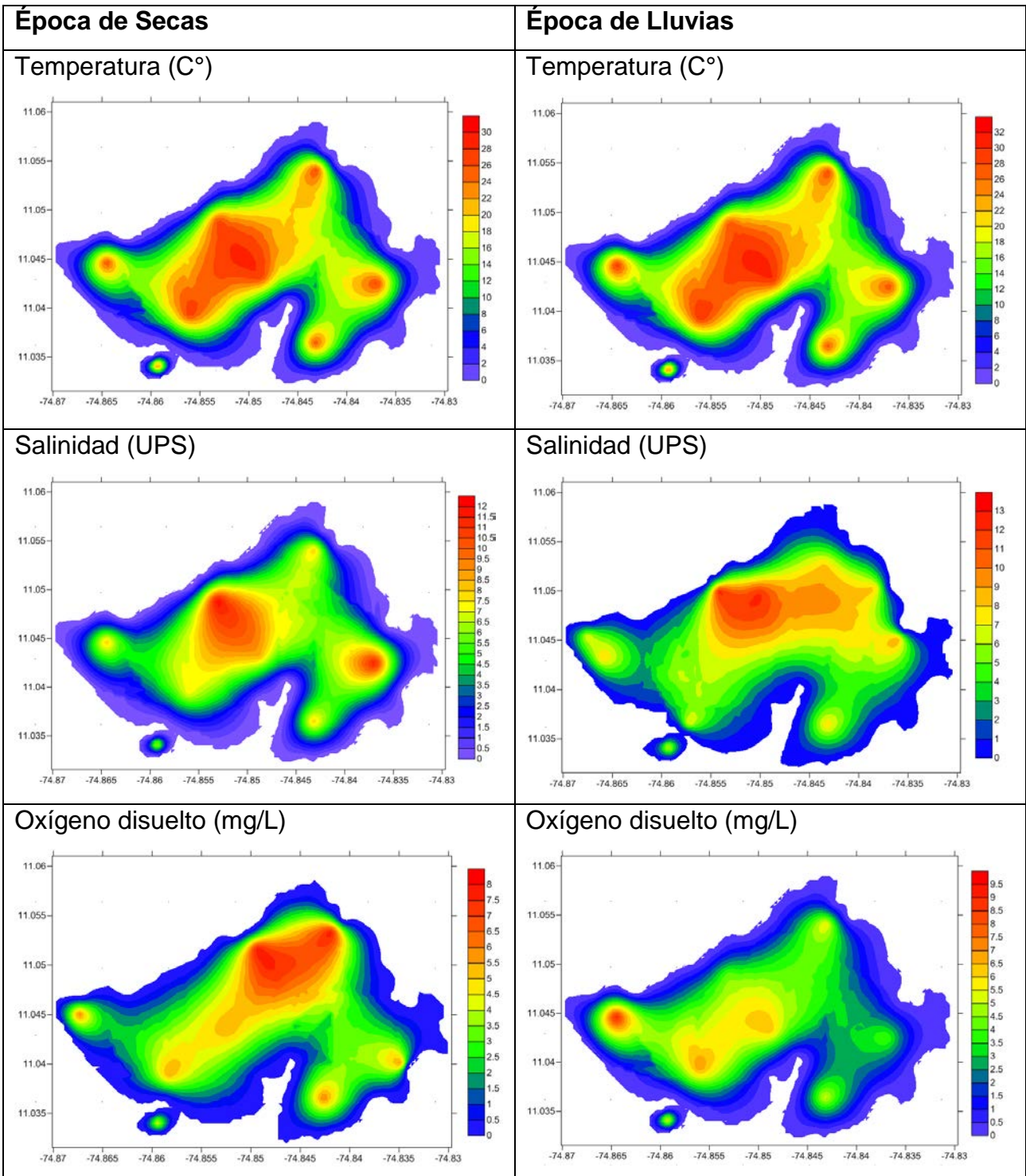


Figura 19. Resultados de las mediciones obtenidas para la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, para las épocas de secas y lluvias.

6. Adaptación del modelo a la zona de estudio

6.1. Condiciones de frontera e iniciales

Como se ha establecido, para reproducir los fenómenos de hidrodinámicos y de transporte que suceden en un cuerpo de agua a través de un modelo numérico, se requiere de la adecuada proporción de condiciones de contorno (Figura 20).

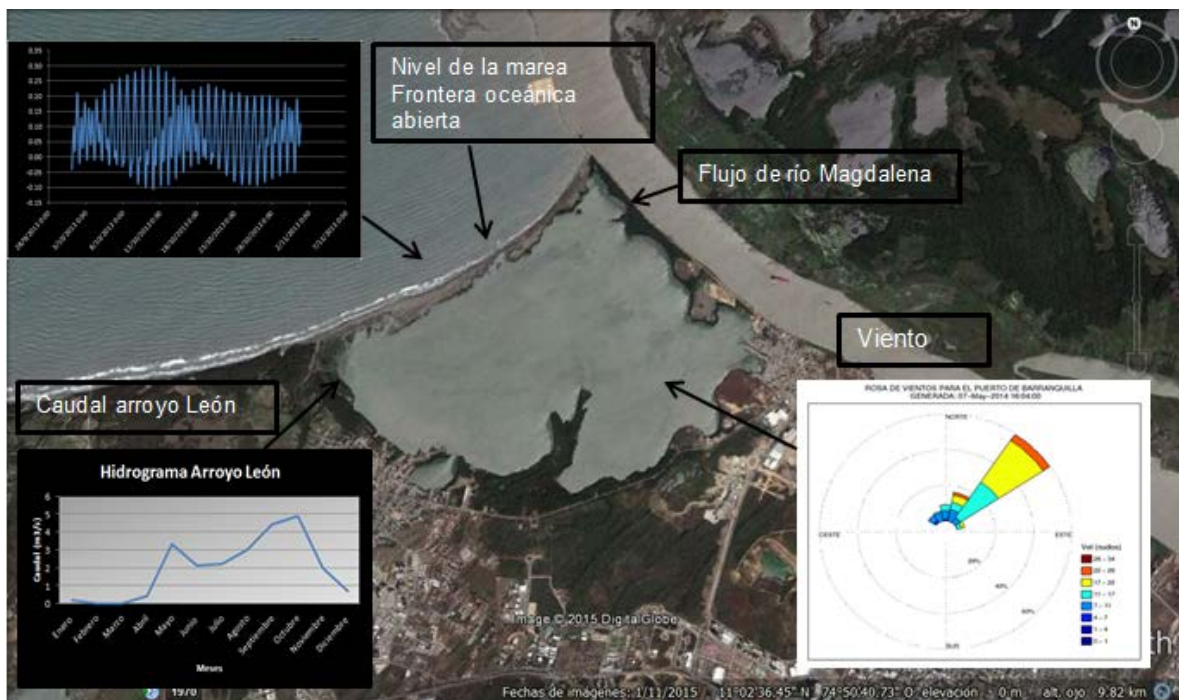


Figura 20. Condiciones de frontera utilizadas para la modelación hidrodinámica (época de lluvias)

Estas condiciones de contorno se pueden configurar a la superficie libre y de fondo del dominio y en los límites laterales dado que pueden ser cerradas, abiertas o móviles, en este estudio se utilizan principalmente las fronteras abierta,

en la conexión ciénaga – mar, para que el modelo permita el ingreso de la marea dentro del sistema y las fronteras cerradas en el resto de la ciénaga y cuando se realizan simulaciones en época de secas (Figura 21), con lo cual se considera que del sistema lagunar no salen masas de agua.



Figura 21. Condiciones de frontera utilizadas para la modelación hidrodinámica (época de secas)

Los valores iniciales de temperatura, salinidad y OD se establecen a partir de estudios realizados por la CRA. El modelo MOHID Studio permite crear “Boxes”, lo cual son cajas de información de una zona en particular del cuerpo de agua objeto de estudio, esto permite representar mejor las condiciones iniciales de las zonas de estudio, donde se presentan diferentes valores de salinidad dependiendo de las zonas de muestreo y en esencia representar la salinidad que entra por parte del mar (Figura 22).

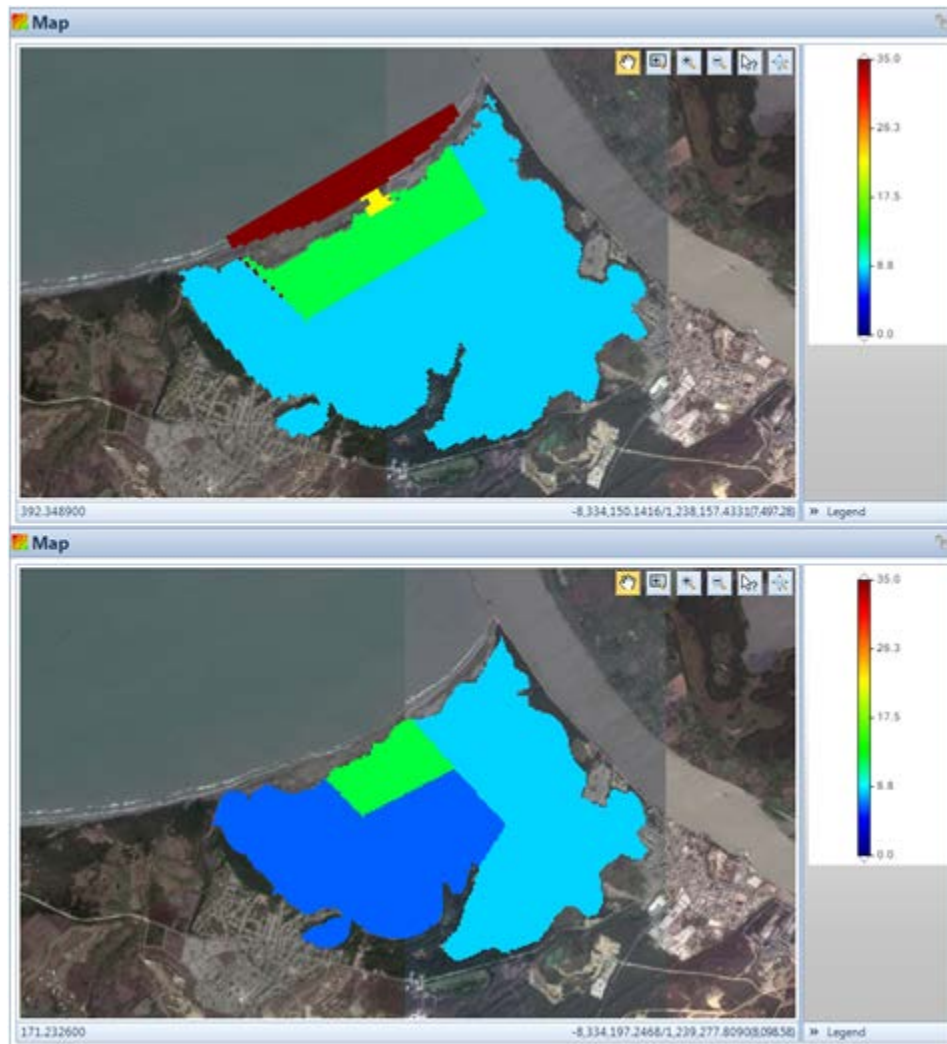


Figura 22. Condiciones iniciales Salinidad (boxes) - época de lluvias (arriba), época de secas (abajo)

Las condiciones de marea astronómica se imponen sobre el borde oceánico del dominio y son obtenidas a partir del atlas global de marea FES2004 (Figura 24).

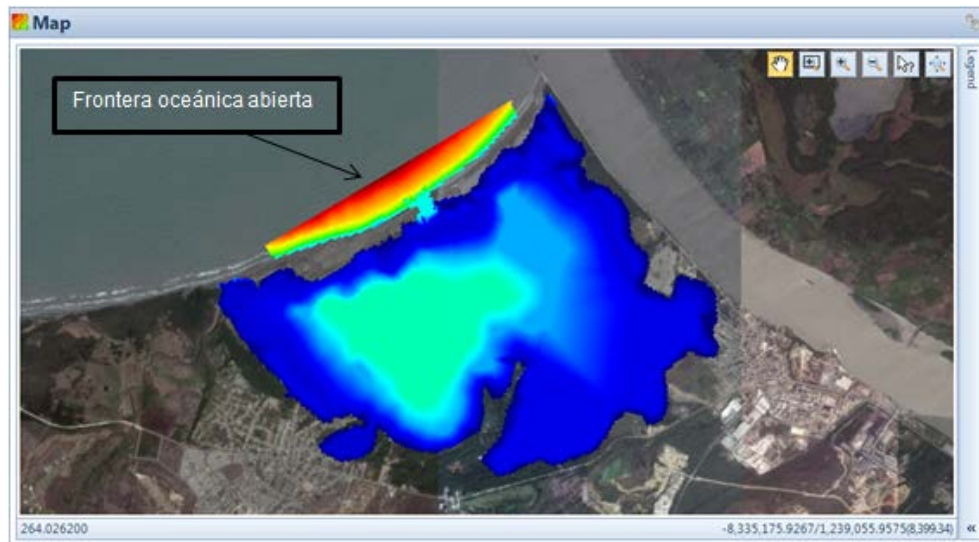


Figura 23. Condición de frontera abierta

6.1.1. Aportes de aguas continentales

En la Figura 20 se observa que sobre las fronteras del dominio de cálculo se incluyen las secciones en las que se dan los aportes de aguas continentales por parte del Arroyo León y el Río Magdalena. En el modelo MOHID dicho aporte es representado como una condición de borde correspondiente a un caudal de entrada determinado. Este ingreso de caudal se divide en dos secciones diferentes, una correspondiente al ingreso del flujo del Arroyo León y otra sección por donde ingresa el aporte del Río Magdalena.

6.2. Malla numérica

El primer paso es generar una malla de cálculo y conocer la batimetría de la región delimitada por la malla. MOHID Studio por medio de su sistema de información geográfica integrado (MOHID GIS) facilita la georeferenciación de la zona de estudio permitiendo que la generación de la malla de cálculo se dé con mayor precisión y facilidad. En la elección del tamaño de la malla se debe establecer un compromiso entre la precisión deseada y el tiempo de cómputo requerido. La

mallla utilizada en la mayor parte de las simulaciones posee el tamaño de 190x150 nodos, con un paso espacial constante alrededor de 20 m y con un ángulo de inclinación de la malla de 30 grados (Figura 24), con el fin de establecer una condición de frontera abierta con la franja oceánica, con lo cual se podrá establecer en el modelo la imposición de las condiciones de marea astronómica en el borde de la frontera oceánica.



Figura 24. Malla numérica utilizada para las simulaciones en la Ciénaga Mallorquín

6.3. Simulaciones 2D

Las simulaciones que se han desarrollado tienen características bidimensionales, integradas en la vertical, dado que una simulación 2D sería suficiente para reproducir la hidrodinámica y los procesos de transporte que se dan dentro de la ciénaga. Una vez calibrado el modelo se realizaron las simulaciones con los escenarios primarios establecidos para cada época climática, se tuvo en cuenta las variaciones de salinidad, temperatura y OD para los distintos escenarios de

simulación, con el fin de analizar el comportamiento hidrodinámico y de transporte de la ciénaga ante las tres forzantes determinadas. Posteriormente se simularon las tres forzantes por separado para establecer las influencias que cada una ejerce en la circulación de la ciénaga y determinar cuál es la que mayor dominio tiene sobre la hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín, para estas simulaciones no se consideran las variaciones en la dirección vertical ni los gradientes de salinidad y temperatura.

6.4. Forzantes

La frontera Este del dominio de cálculo incluye una sección de aporte de caudal fluvial del Rio Magdalena, mientras que en la frontera Oeste se tiene en cuenta el aporte del arroyo León. La Ciénaga Mallorquín es forzada con marea astronómica, forzantes atmosféricos y aportes de aguas continentales como se ha mencionado anteriormente. La marea es impuesta en el borde por medio del FES2004, el cual es la última versión de los atlas de mareas FES generados con un modelo que resuelve las ecuaciones hidrodinámicas de marea. La imposición del viento en el dominio de estudio es realizado con datos meteorológicos obtenidos del CIOH (Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas) para las épocas de lluvias y de secas (Figura 25).

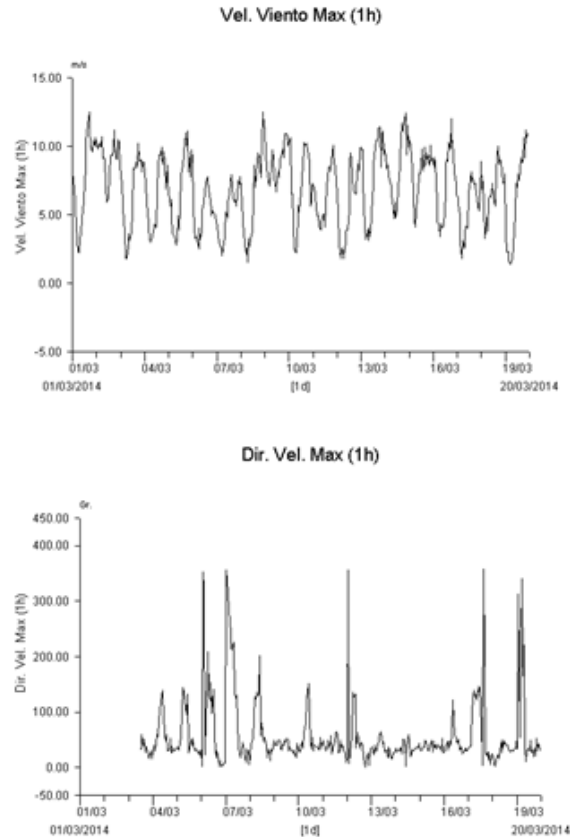


Figura 25. Velocidad y dirección del viento impuesta en todo el dominio de simulación para la época de secas

Los resultados del modelo fueron analizados y comparados mediante series de tiempo o archivos de salida del modelo, las cuales pueden ser ubicadas en cualquier punto determinado de la zona de estudio del cual se tenga un particular interés, las series de tiempo contiene los resultados de puntos de la malla de cálculo predefinidas con una alta frecuencia de salida. Con la visualización grafica de las series de tiempo se analizaron los resultados obtenidos por el modelo, principalmente, velocidades de corriente, con lo cual se puede establecer la influencia que presentan estos procesos en la hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín.

En la Figura 26 se muestra la ubicación y el nombre de las series de tiempo sobre la Ciénaga Mallorquín establecidas en el modelo MOHID Studio.

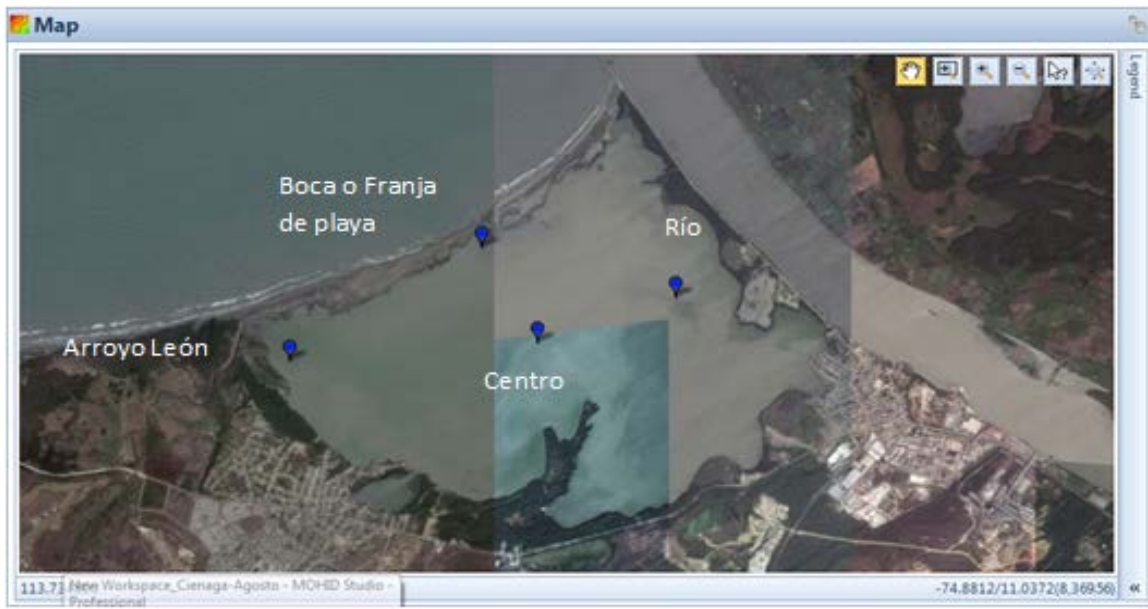


Figura 26. Ubicación de las series de tiempo en la Ciénaga Mallorquín establecido dentro del modelo MOHID Studio

Para definir los parámetros de la turbulencia se especifican las viscosidades, las cuales representan la mezcla o difusión asociado a los procesos, no se tiene en cuenta en la velocidad media de células (llamado turbulencia) y por lo que depende de la malla utilizada, las unidades son m^2/s y constituyen una velocidad turbulenta (m/s) multiplicado por la longitud de mezcla (m). En el caso de simulaciones bidimensionales no se considera la viscosidad vertical (no hay movimiento vertical) y para estimar la viscosidad horizontal se utiliza una velocidad turbulenta (generalmente un porcentaje de la velocidad promedio) y se multiplica por el tamaño de celda. Para el caso de estudio de la Ciénaga Mallorquín se estimará una velocidad media representativa de 0,1 m/s, por lo cual si la velocidad turbulenta es de alrededor de 10% de la media, entonces es de alrededor de 0,01 m/s. Para este caso se utiliza una malla con alrededor de 20 metros de espaciado entre células de la malla, entonces la viscosidad estimada será de 0,1 m^2/s (0,02 m/s * 20 m).

Las batimetrías (Figura 27) que se utilizan para las simulaciones han sido obtenidas a partir del mapa batimétrico realizado por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico, acompañada de la digitalización de la carta náutica del mar Caribe, con el fin de contar con la batimetría de la franja oceánica adyacente a la Ciénaga Mallorquín.

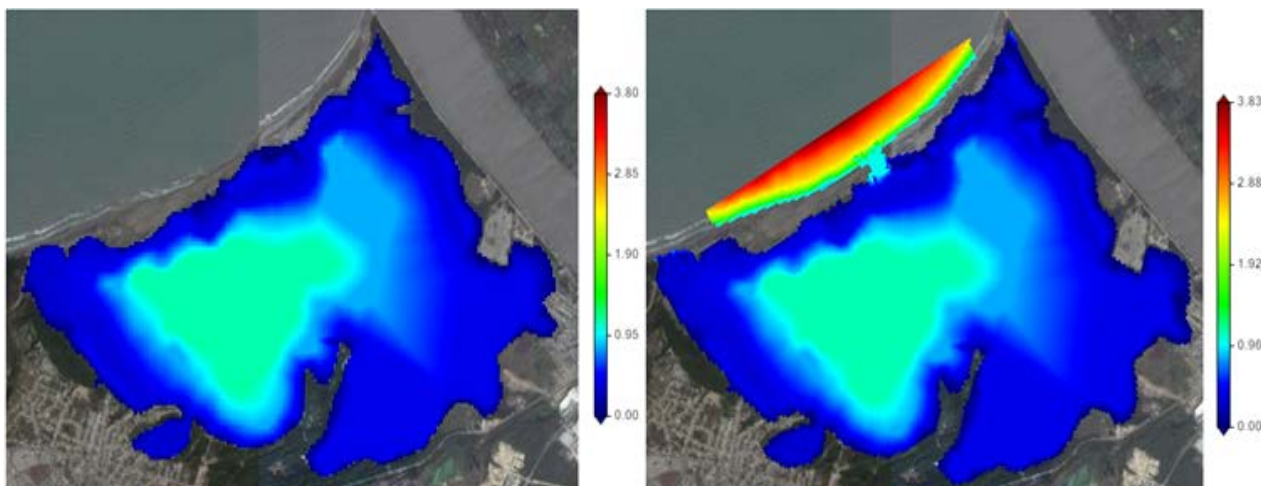


Figura 27. Batimetrías utilizadas para las simulaciones en época de secas (Izquierda) y en épocas de lluvias (Derecha) en la Ciénaga Mallorquín. Unidades de profundidad en metros.

7. Aplicación del modelo a la zona de estudio y resultados

7.1. Introducción

Una vez adaptado el modelo a la zona de estudio, se procedió a la aplicación del mismo, mediante las simulaciones, a continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas bajo diferentes condiciones, con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados en el trabajo de investigación.

El presente proyecto de investigación ha sido desarrollado con recursos propios, por lo que la obtención de información ha sido de carácter indirecto, proporcionada por entidades como la CRA, el CIOH, INVEMAR entre otros. Los parámetros de interés para este trabajo (salinidad, temperatura y OD) se han podido conseguir para cada época de simulación, a través de estudios realizados por la CRA. Las mediciones de niveles de la marea realizadas por el CIOH, se han usado para calibrar la hidrodinámica del escenario de lluvias, en el escenario de secas se presenta la dificultad de no poder contar con información ni registros históricos disponibles, dada la inexistencia de estaciones de medición en la Ciénaga Mallorquín, por parte de las entidades ambientales y en definitiva ante la imposibilidad de realizar mediciones de campo propias, en parte por costos económicos y por la dificultad para contar con equipos de medición. En efecto el escenario de secas ha sido ajustado con base en el escenario de lluvias y teniendo en cuenta el conocimiento hidrodinámico que se tiene sobre este tipo de cuerpos de aguas.

7.2. Simulaciones hidrodinámicas y de transporte de la Ciénaga Mallorca para época de secas

La simulación dentro de este escenario se realizó teniendo como forzantes las condiciones meteorológicas de la época y los AAC, con el objetivo de reproducir la dinámica de circulación en la Ciénaga Mallorca y de esta manera entender su funcionamiento hidrodinámico y como se dan los procesos de transporte en parámetros como la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en la ciénaga durante esta época del año, cuando no está influenciada entre otros factores por el accionar de las mareas.

Una vez el modelo está calibrado y se obtiene la simulación hidrodinámica de la ciénaga para la época de secas, se procede a simular la hidrodinámica de la ciénaga con cada una de las forzantes por separado (condiciones meteorológicas y AAC), con el objetivo de determinar que forzante ejerce mayor dominio sobre la circulación de la ciénaga. Para estas simulaciones no se tendrán en cuenta las variaciones de los gradientes de salinidad y temperatura además de la evolución del oxígeno disuelto.

Las simulaciones comprenden desde el 8 de enero del 2013 hasta el 11 de enero del mismo año, con estabilidad numérica comprobada todo el tiempo, por el número de Courant y un paso del tiempo Δt de 3 segundos, se utilizan caudales estimados por el POMCA (2007), de 1 m^3 como aporte del río Magdalena y 0.5 m^3 para caudal aportante por parte del arroyo León. Los valores para la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, de cada efluente dentro de la ciénaga (arroyo León y Río Magdalena) se establecieron teniendo en cuenta mediciones de campo realizadas por la CRA (2013).

7.2.1. Calibración modelo de transporte época de secas

El proceso de calibración consiste en comprobar que el modelo reproduce la realidad del sistema objeto de estudio con un grado de exactitud que genere confianza y además adecuado para la aplicación deseada. En si la calibración está ligada al propósito del modelo, por lo tanto la información conocida se comparará con los resultados de la modelación, con lo cual se ha mostrado la capacidad de adaptación del modelo a la zona de estudio. En la calibración hidrodinámica de la ciénaga para época de secas se tiene en cuenta que la misma no está en contacto con el mar, por lo que las fronteras están cerradas, siendo la ciénaga afectada por procesos como la evaporación y la radiación entre otros, además de los aportes de aguas continentales que son el principal aporte al espejo de agua de la ciénaga junto con la precipitación. Para la calibración se establecerá una comparación de los niveles existentes medidos en campo con los arrojados por el modelo, ajustando los parámetros que afectan este proceso dentro del modelo con el fin de obtener niveles similares entre lo simulado y lo medido.

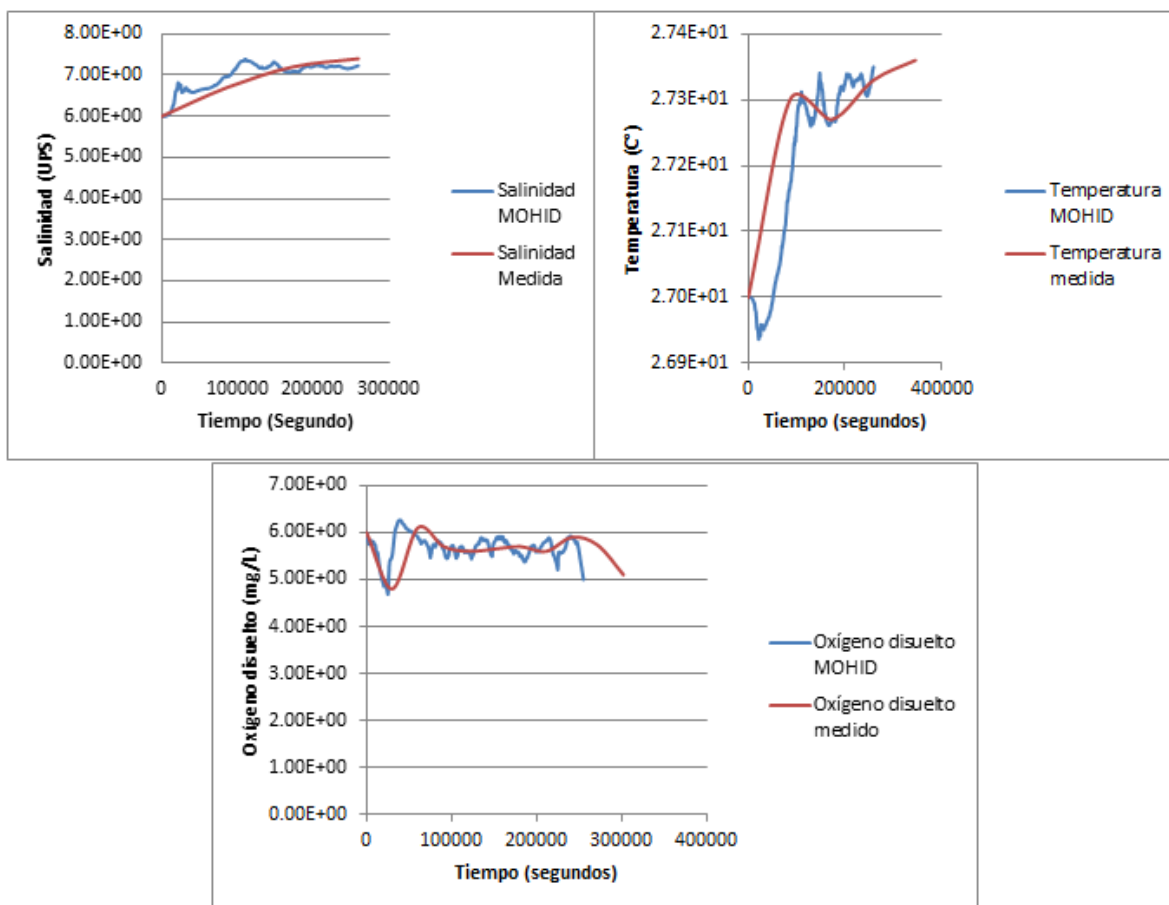


Figura 28. Ajuste de salinidad, temperatura y Oxígeno disuelto

En la Figura 28 se muestra el resultado del ajuste de los parámetros como la salinidad, la temperatura y el oxígeno disuelto para la época de secas. Se obtiene una buena relación entre lo medido en campo y lo simulado por el modelo MOHID, permitiendo representar adecuadamente mediante el modelo lo que en la zona de estudio se presenta.

7.2.2. Simulación hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín para época de secas

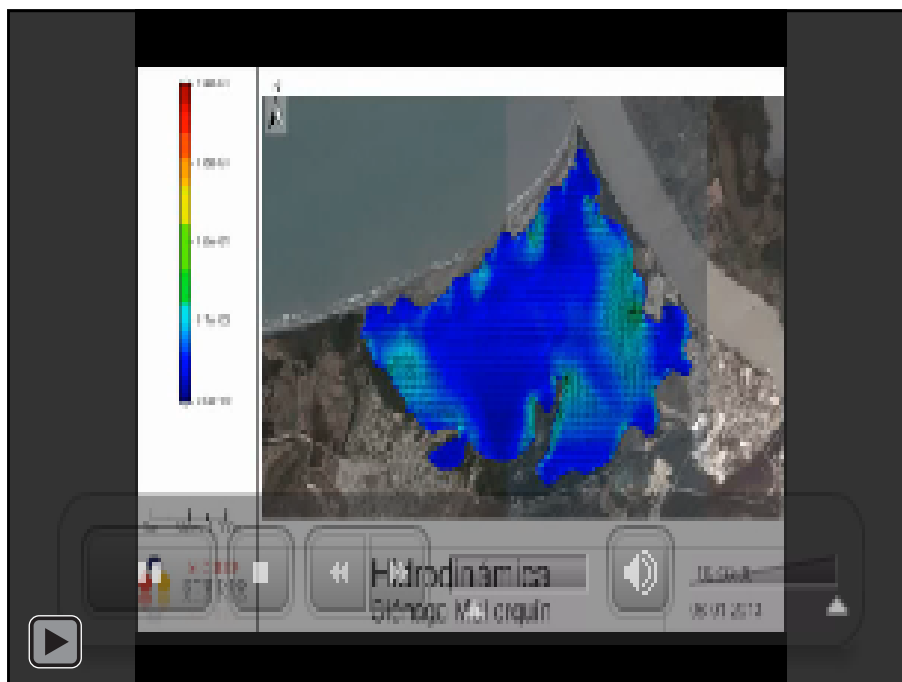


Figura 29. Campo de velocidades integradas en profundidad en época de secas, para el momento indicado en la figura.

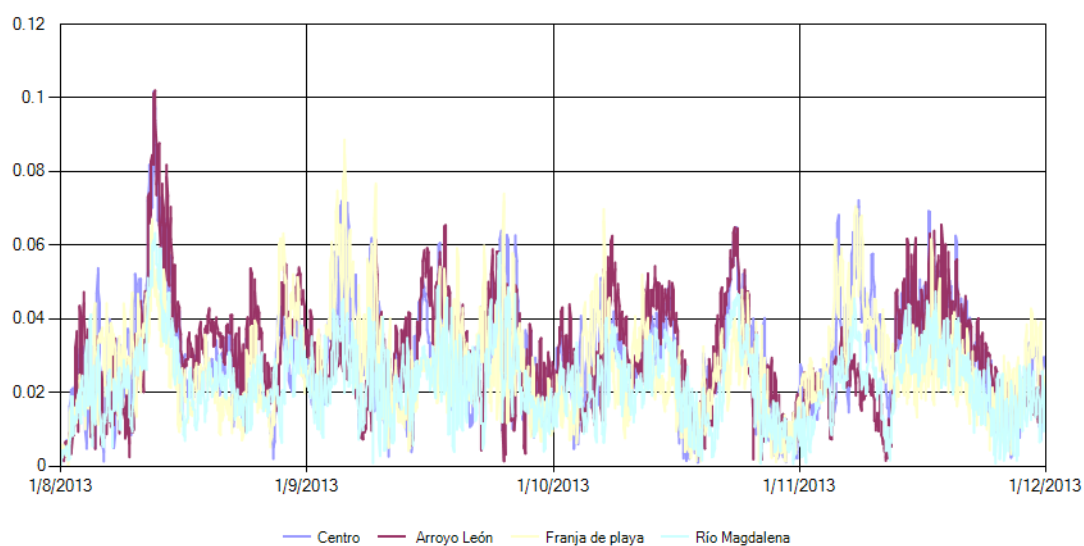


Figura 30. Resultados series de tiempo – época de secas. Velocidades (m/s)

En el desarrollo de la simulación hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín para la época de secas se tuvieron en cuenta como se ha mencionado antes, las

condiciones meteorológicas y descargas de aguas continentales, por lo que se entiende que la ciénaga no tiene influencia de las mareas. En la simulación se observa como los movimientos de masas de agua se dan principalmente por la forzante del viento, lo anterior se acepta teniendo en cuenta que en sistemas como lagos o lagunas, el viento es el principal causante del apilamiento de las masas de agua en la dirección en que sopla, por lo anterior las descargas de aguas continentales son muy poco influyentes en la circulación de la ciénaga, esto pudiendo ser debido al poco o escaso caudal aportante por cada uno de los puntos de descargas. En la comparación de los resultados de velocidades de las series de tiempo (Figura 30) se observa unas velocidades parejas a lo largo de la ciénaga, siendo la zona de la serie de tiempo denominada “Arroyo León” la que marcó mayores velocidades, aunque sin estar por encima de forma significativa de las que se presentan en las demás zonas de la Ciénaga Mallorquín.

7.2.3. Simulación hidrodinámica de los aportes de aguas continentales

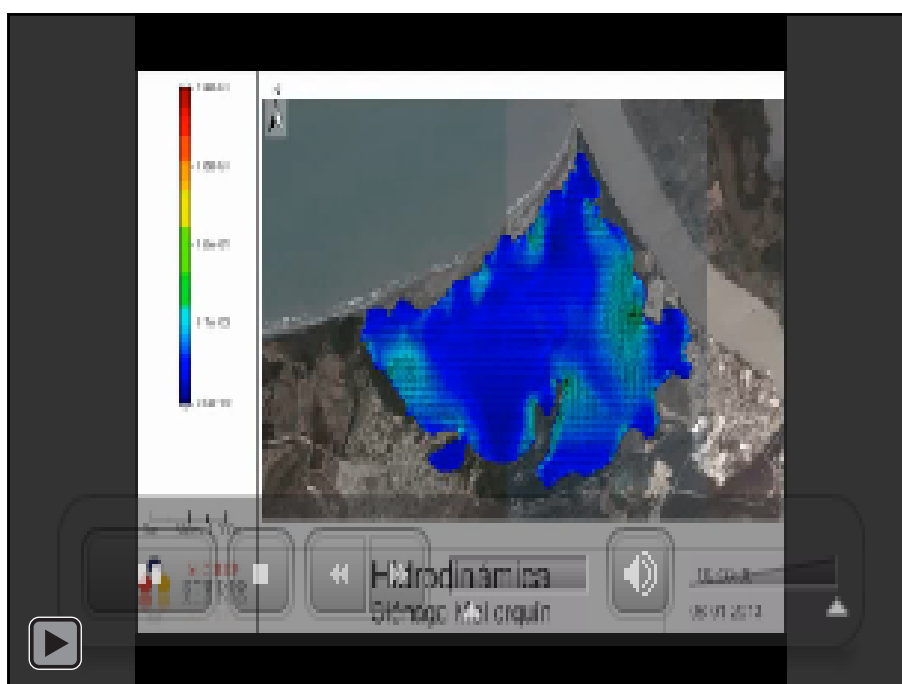


Figura 31. Campo de velocidades integradas en profundidad en época de secas, para el momento indicado en la figura.
Simulación de Aportes de Agua Continentales

Para esta simulación (Figura 31) solo se tuvo en cuenta el AAC como forzante del sistema lagunar Ciénaga Mallorquín, dejando invariable las constantes cinéticas y demás aspectos como el caudal de los aportes, usados en la simulación hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín para época de secas. Como resultado de la simulación se puede apreciar el escaso alcance de los aportes de aguas continentales dentro de la ciénaga para la época de secas, sin estar interactuando con otras forzantes. Dado el escaso caudal aportante, se destaca la poca incidencia de estos aportes en la hidrodinámica de ciénaga. Presentando velocidades muy bajas, incluso despreciables (Figura 32) en gran parte de la ciénaga, principalmente hacia el centro de la misma.

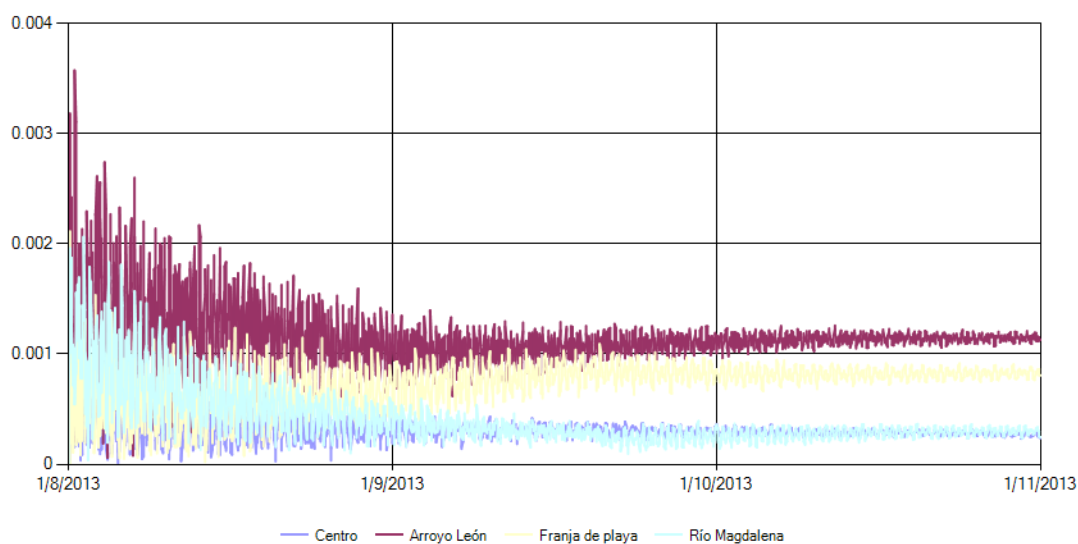


Figura 32. Resultados series de tiempo - AAC. Velocidades (m/s).

7.2.4. Simulación hidrodinámica del viento como única forzante

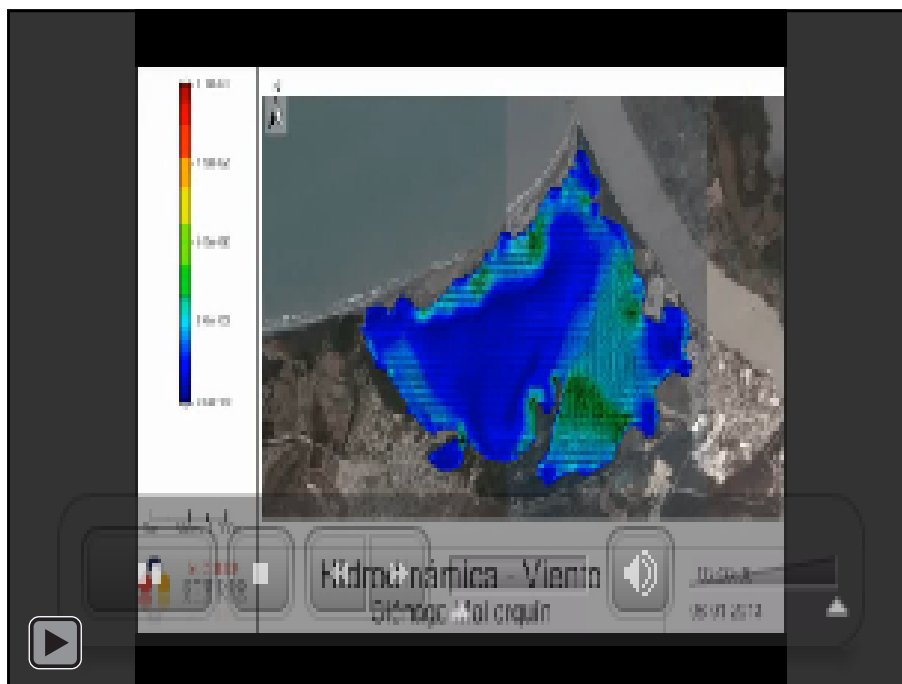


Figura 33. Campo de velocidades integradas en profundidad en época de secas, para el período de simulación de 8 Ene /13 – 11 Ene /13. Simulación hidrodinámica del viento como única forzante.

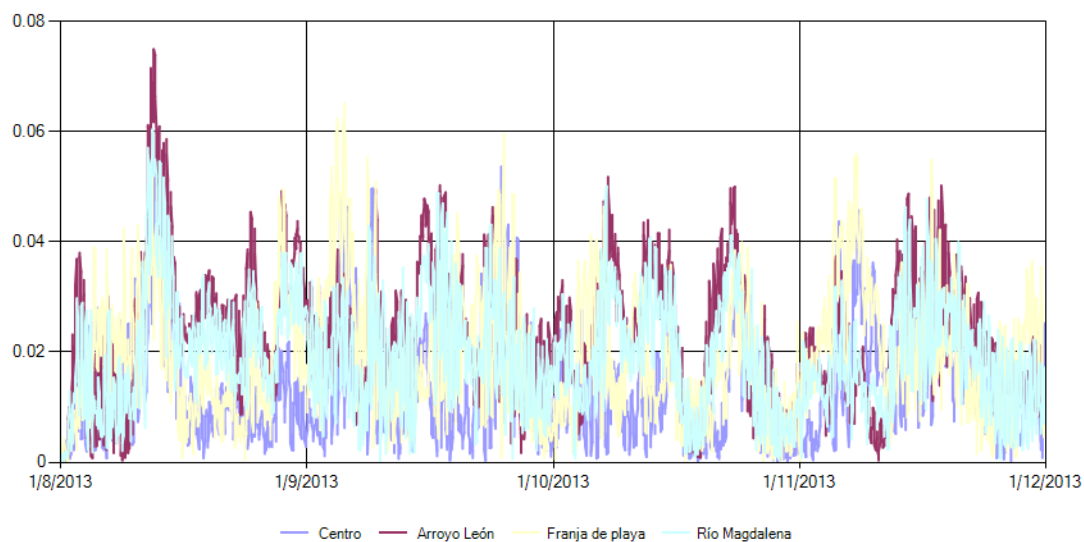


Figura 34. Resultados series de tiempo - Viento. Velocidades (m/s).

Al igual que en la simulación anterior, en esta solo se tuvo en cuenta el viento como forzante del sistema lagunar costero. En la simulación (Figura 33) se puede

observar como el viento domina en la circulación dentro de la ciénaga, generando el desplazamiento de masas de agua en la dirección que sopla, caso similar a la primera simulación. En la simulación del viento se presentan las mayores velocidades, principalmente hacia la zona del arroyo León (Figura 34).

7.2.5. Simulación del transporte y comportamiento de la salinidad, temperatura y OD

7.2.5.1. Simulación de la salinidad

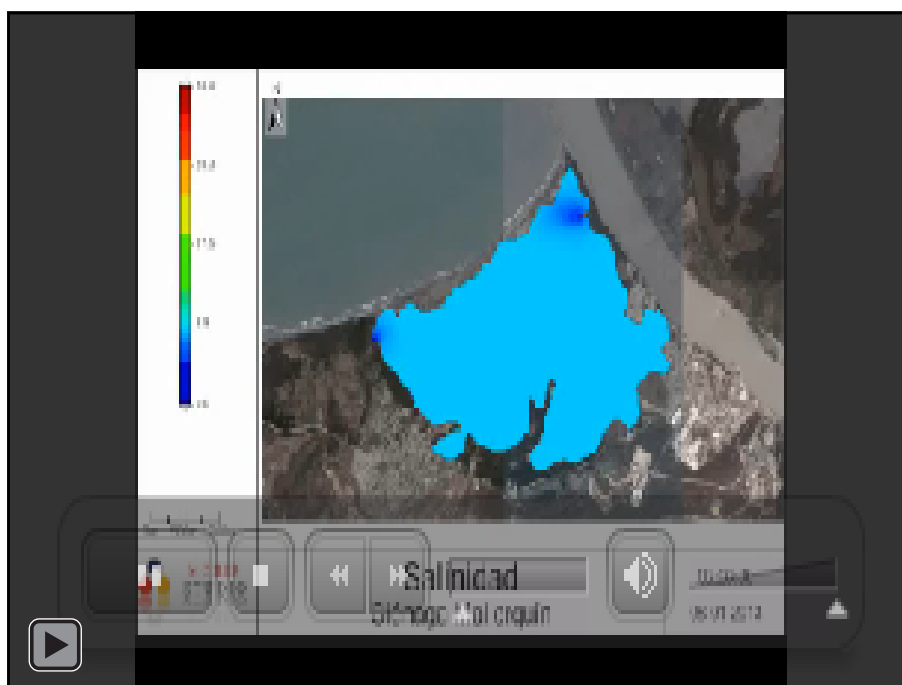


Figura 35. Salinidad simulada en época de secas (Período de simulación 8 Ene /13 – 11 Ene /13)

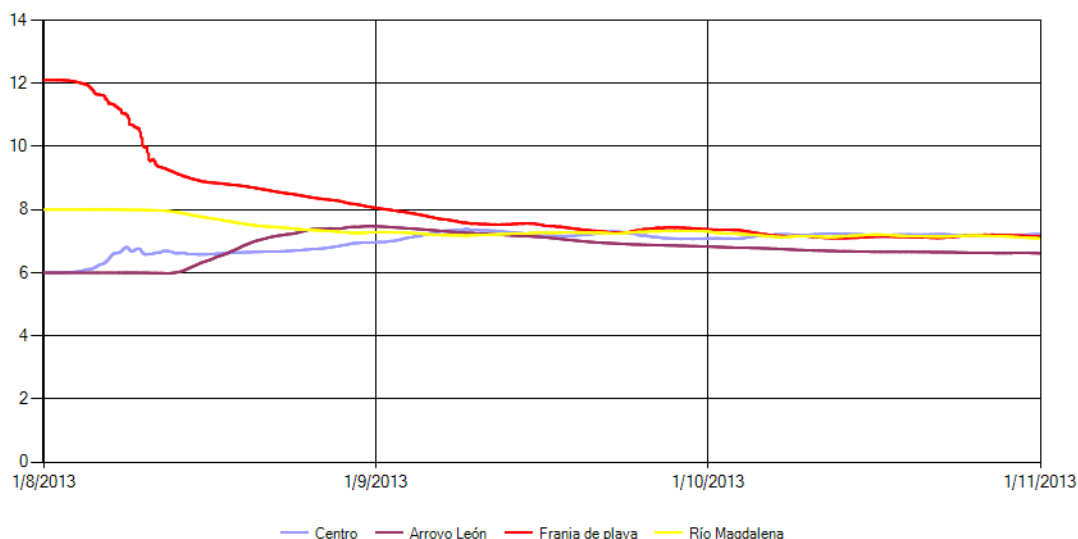


Figura 36. Resultados series de tiempo. Simulación de Salinidad (UPS).

En distintas zonas de la ciénaga la salinidad presenta diferentes valores, siendo mayores a medida que se acercan a la barra de arena que separa la ciénaga del mar. Por lo que se puede observar según la Figura 36 como la salinidad evoluciona a partir de su estado inicial hasta encontrar un equilibrio en gran parte de la ciénaga. La salinidad dentro de la ciénaga para esta época climática tiene un comportamiento que está dominado por el transporte difusivo, dado que para este escenario se trata de un cuerpo de agua con condiciones de fronteras cerradas y no se presentan aportes importantes de caudales que alteren el régimen de circulación en la ciénaga. Permitiendo que se den bajas velocidades como se mostró en la simulación hidrodinámica, por lo que la salinidad tiene una evolución constante a través de la ciénaga, dominado como se ha mencionado por el transporte difusivo.

7.2.5.2. Simulación de la temperatura

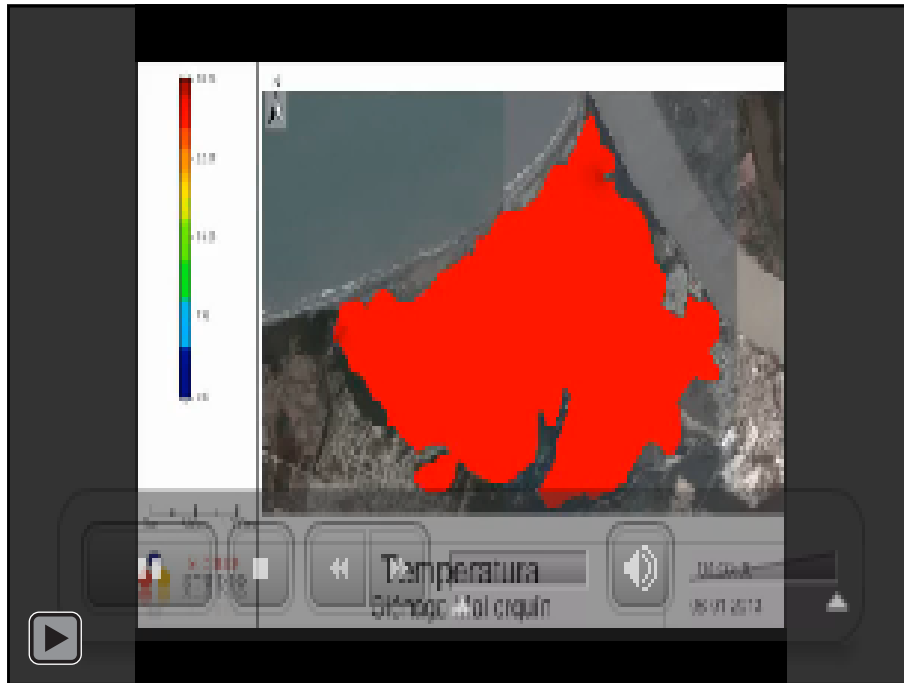


Figura 37. Temperatura simulada en época de secas (periodo de simulación 8 Ene /13 – 11 Ene /13)

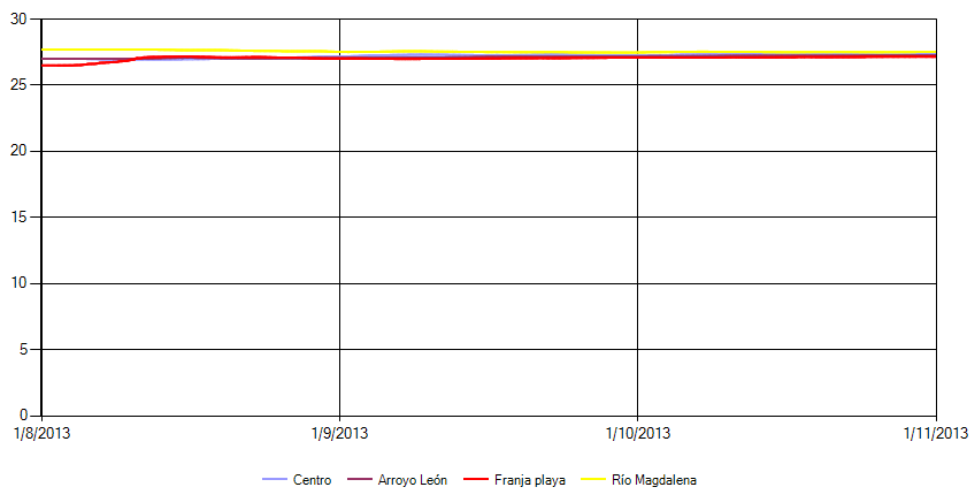


Figura 38. Resultados series de tiempo. Simulación de Temperatura (C°).

La temperatura a lo largo de la ciénaga no presenta variaciones importantes, manteniendo valores constantes. Condiciones como la poca profundidad, bajas

velocidades de corrientes o el escaso aporte de aguas continentales para esta época del año, permiten que el intercambio térmico se de en toda la ciénaga, además se tiene en cuenta que la temperatura de los AAC son en mayores a los presentes dentro de la Ciénaga Mallorquín, por lo que los AAC no contribuyen a mantener niveles de temperatura apropiados dentro del cuerpo de agua receptor.

7.2.5.3. Simulación del Oxígeno disuelto

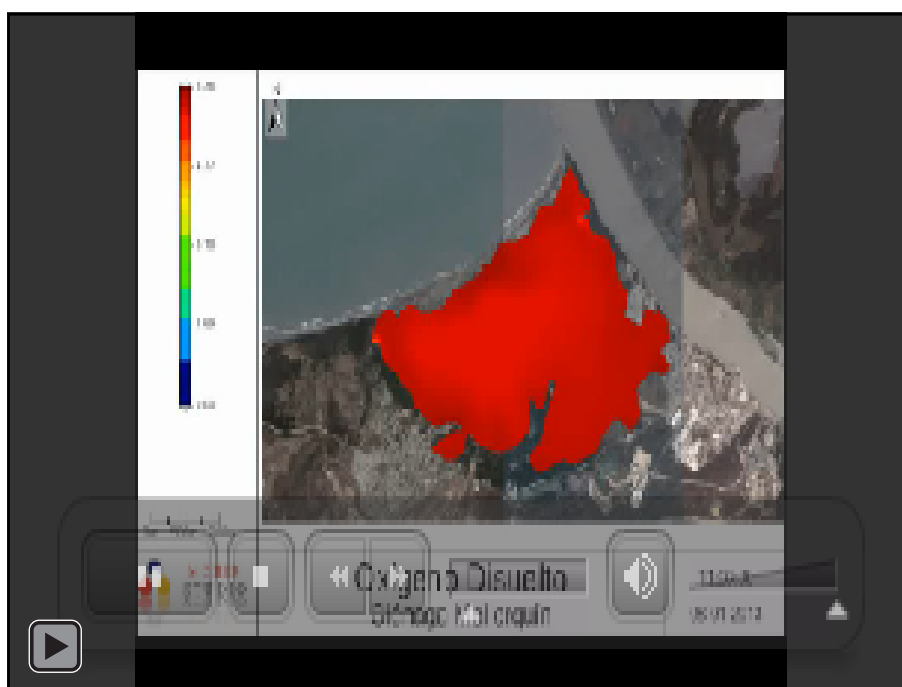


Figura 39. Oxígeno disuelto simulado en época de secas (Periodo de simulación 8 Ene /13 – 11 Ene /13)

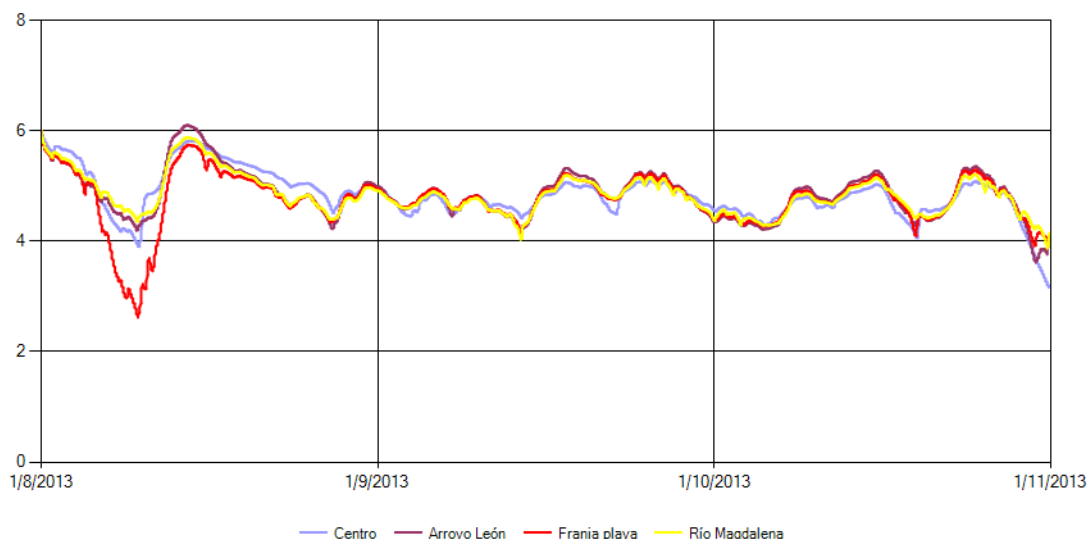


Figura 40. Resultados series de tiempo. Simulación de Oxígeno Disuelto (mg/l).

Se tiene en cuenta que el OD influye en la gran mayoría de los procesos biogeoquímicos que se dan en los cuerpos de agua y a su vez hay diferentes factores que afectan los niveles del OD. En la Ciénaga Mallorquín, el OD se ve afectado principalmente por los vertimientos no puntuales de aguas residuales, las descargas de aguas residuales que llegan por medio del arroyo León y por los sedimentos en la ciénaga, que de igual forma requieren de oxígeno dentro de sus ciclos, entre otros factores. Si bien el estudio de los parámetros de calidad de agua no hacen parte del presente estudio, si se han tenido cuenta aspectos de los que se posee información, como la demanda biológica de oxígeno (DBO), nitratos, nitritos y la temperatura. En la Figura 39 muestra que la ciénaga presenta en general valores por encima de 5 mg/L de OD, con lo cual se está por encima de las concentraciones mínimas que estos tipos de cuerpo de agua requieren para funcionar adecuadamente. El OD se ve afectado por el transporte difusivo, dada las bajas velocidades que se presentan en la ciénaga, por lo que sus concentraciones en la misma están sujetas a los procesos de reaeración entre la atmosfera y el espejo de agua de la Ciénaga Mallorquín.

7.3. Simulaciones hidrodinámica y de transporte de la Ciénaga Mallorquín para época de lluvia

La simulación dentro de este escenario se realizó teniendo como forzantes la marea, las condiciones meteorológicas de la época y los AAC, con el objetivo de reproducir la dinámica de circulación en la Ciénaga Mallorquín y de esta manera entender su funcionamiento hidrodinámico y como se dan los procesos de transporte en parámetros como la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en la ciénaga durante esta época de lluvias.

Con el modelo calibrado se obtiene la simulación hidrodinámica de la ciénaga para la época de lluvias, se procede a simular la ciénaga siendo forzado únicamente por la marea, se reproduce la entrada de la marea dentro de la ciénaga mallorquín para la época de lluvias, dado que se quiere establecer la influencia de la marea en la dinámica de circulación de la ciénaga y de esta forma poderla comparar con los resultados de simulaciones anteriores donde se representa cada forzante por separado. Para esta simulación no se tendrán en cuenta las variaciones de los gradientes de salinidad y temperatura además de la evolución del oxígeno disuelto.

La simulación se realizó para las fechas comprendidas entre octubre 10 del 2013 y octubre 14 del mismo año, fue llevada a cabo de forma 2D con una sola capa en la vertical, con un espacio del tiempo de 4 segundos, lo que permitió una adecuada estabilidad numérica de la simulación. Los caudales para los efluentes (arroyo León y río Magdalena) son estimados por el POMCA (2007), y para la época de lluvias es de 1 m³ como aporte del río Magdalena y 4.9 m³ para caudal aportante por parte del arroyo León. Los valores para la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, de cada efluente dentro de la ciénaga se establecieron teniendo en cuenta mediciones de campo realizadas por la CRA (2013).

7.3.1. Calibración hidrodinámica época de lluvias

La calibración del modelo hidrodinámico para la época de lluvias se realizó mediante la comparación de los niveles de la marea obtenidos del modelo con los registrados por el CIOH para el mes de Octubre del 2013. Se observa una buena relación de los niveles de la marea simulados por el modelo MOHID con los niveles registrados (Figura 41).

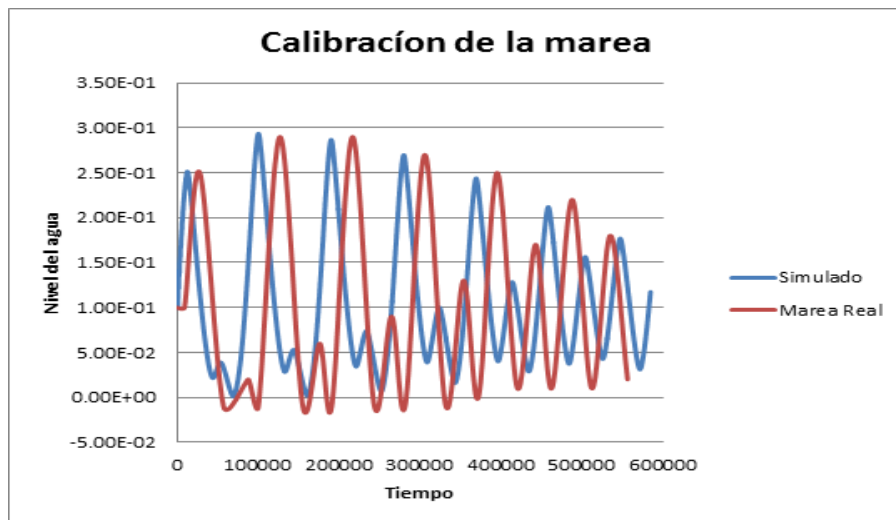


Figura 41. Calibración hidrodinámica

A partir de la amplitud de los principales armónicos diurnos (K1 y O1) y semidiurnos (M2 y S2) es posible calcular un parámetro denominado factor de forma (F) (ecuación 12) que define qué tipo de componentes dominan la marea.

$$F = \frac{(K1 + O1)}{(M2 + S2)} \quad (12)$$

En función del valor del factor de forma F, la marea astronómica suele clasificarse en: marea de tipo semidiurno ($F \leq 0,25$), marea de tipo mixto con predominio semidiurno ($0,25 < F < 1,5$), marea de tipo mixto con predominio diurno ($1,5 < F < 3$) y marea de tipo diurna ($F > 3$). Los valores para los componentes armónicos que hacen parte de la ecuación 12 se obtienen a partir del paquete T_TIDE, que se

incorpora a la función “tidal tool” integrado al MOHID Studio, esta función permite a su vez que el modelo integre la herramienta FES 2004.

$$M2= 0.0674803$$

$$S2= 0.00803292$$

$$K1= 0.0929695$$

$$O1= 0.0538278$$

$$F = \frac{(0.0929695 + 0.0538278)}{(0.0674803 + 0.00803292)}$$
$$F = 1,94$$

Como resultado de esta ecuación y en base a los componentes armónicos de la zona adyacente a la Ciénaga Mallorquín, se tiene que la marea astronómica es de tipo mixto con predominio diurno.

7.3.2. Simulación hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín para época de lluvias

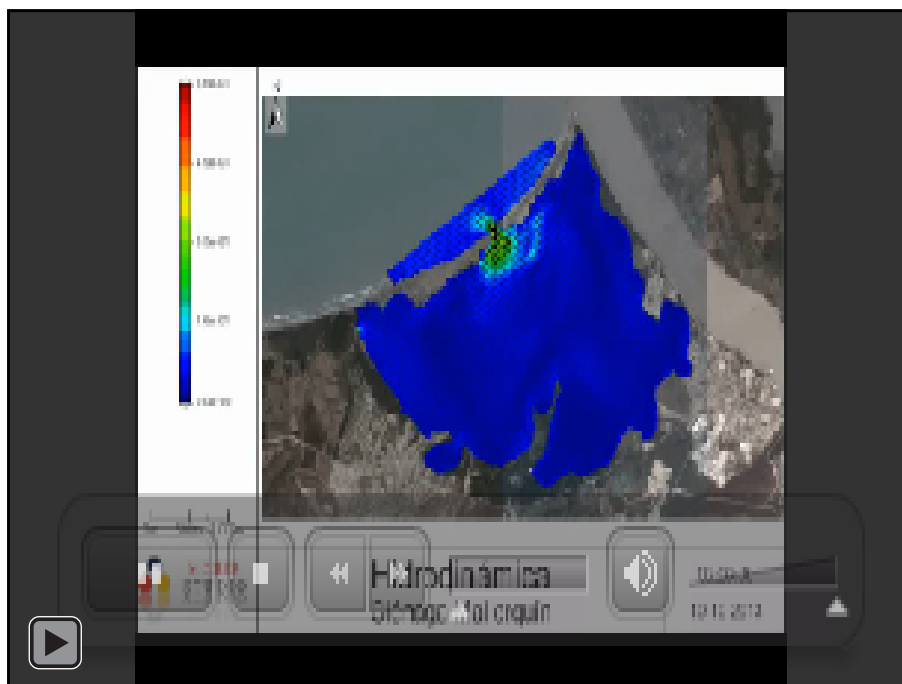


Figura 42. Campo de velocidades integradas en profundidad de la simulación hidrodinámica – época de lluvias, para el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13

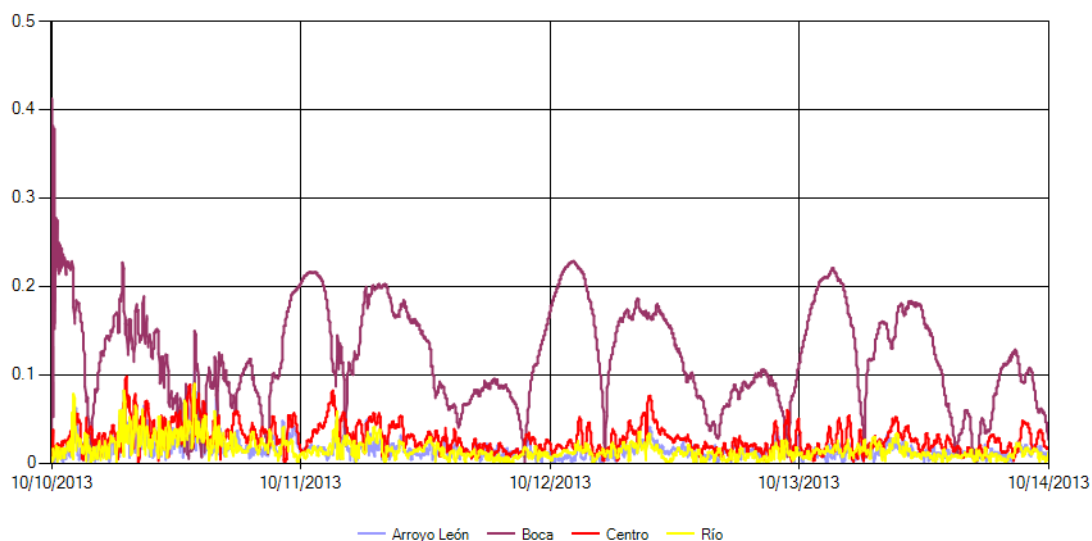


Figura 43. Resultado series de tiempo – época de lluvias – Velocidades (m/s).

Para este escenario de simulación se tuvo en cuenta a la marea como forzante, además de las condiciones meteorológicas y el AAC. La marea como se ha mencionado se ha establecido como una condición de frontera abierta,

permitiendo al modelo considerar el ingreso de las mareas sobre el sistema. En la Figura 42 se muestra el campo de velocidades de la corriente integrada en la vertical para un momento de flujo y reflujo.

En la simulación se observa como las mayores velocidades se presentan en la entrada o boca que permite la conexión ciénaga – mar (Figura 43), teniendo gran incidencia principalmente en la barra de arena que separa a la ciénaga del mar. En el resto de la ciénaga si bien la marea no deja de ser influyente en la dinámica de circulación, la simulación mostro que la marea interactúa en conjunto con el viento y los AAC, estos últimos para la época aumentan su caudal aportante dado que arrastran la escorrentía de la cuenca hacia la ciénaga. El comportamiento hidrodinámico de la ciénaga se ve dominado por la difusión en gran parte de la misma, adquiriendo mayor influencia el transporte advectivo en las zonas donde se dan las descargas del arroyo león y en la zona de interacción del mar con la ciénaga.

7.3.3. Simulación hidrodinámica de la marea

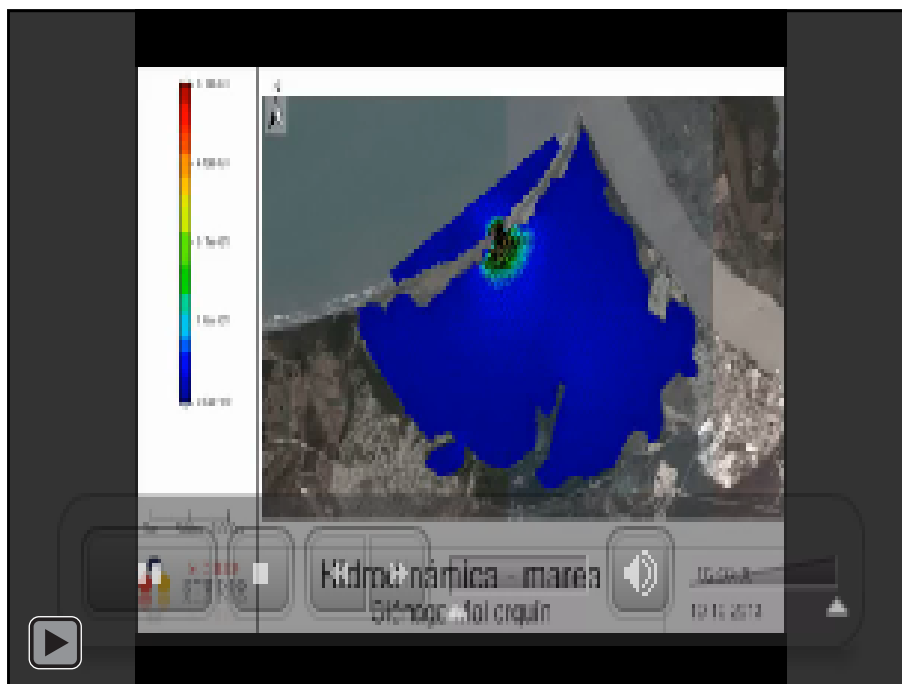


Figura 44. Campo de velocidades integradas en profundidad para la corriente de marea, para el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13

Para esta simulación solo se tuvo en cuenta a la marea como forzante, dado que el objetivo de esta simulación es la obtención de la corriente de la marea y los alcances de la misma dentro de la Ciénaga Mallorquín.

La simulación muestra al igual que la anterior, que las mayores velocidades se presentan en la entrada o boca de la ciénaga, sin embargo esto no debe llevar a pensar en un gran transporte de agua mar – ciénaga, dado la poca y a veces escasa profundidad de la zona y de la ciénaga en sí misma, la cual se ubica prácticamente al mismo nivel del mar. En la Figura 44 se observa que la corriente de la marea no alcanza a llegar a las zonas más alejadas de la boca, por lo que se entiende que su dominio no se extiende hacia toda la Ciénaga Mallorquín, siendo estas zonas más alejadas dominadas por otros factores como bien puedan ser las condiciones meteorológicas o los AAC.

7.3.4. Simulación hidrodinámica de los AAC

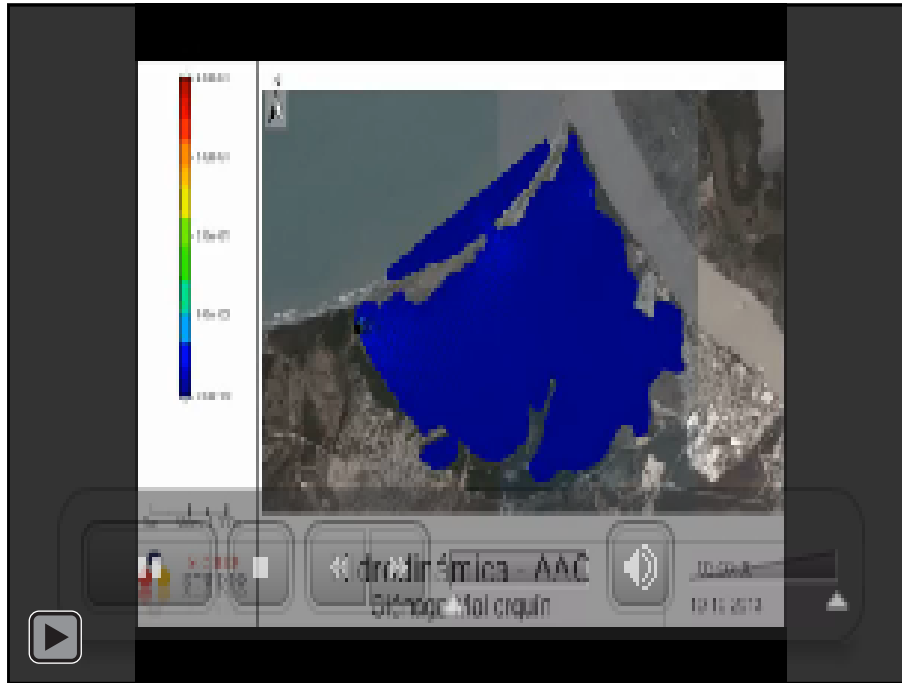


Figura 45. Campo de velocidades integradas en profundidad para la simulación de los AAC, en el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13.

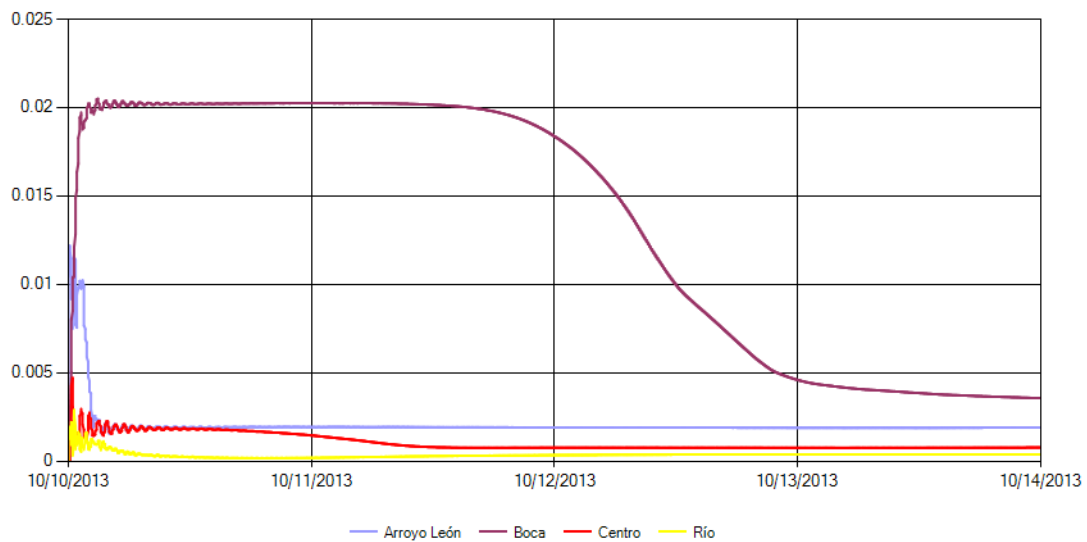


Figura 46. Series de tiempo. Velocidades (m/s).

En esta simulación solo se tuvo en cuenta a los AAC como única forzante, con el objetivo de establecer el alcance que tienen dichos aportes sobre la dinámica de circulación de la Ciénaga Mallorquín, para esta época de simulación. Para esta simulación se dejó la frontera oceánica abierta sin tener a la marea como forzante, de esta forma se buscaba ver si con la circulación generada por los AAC se llegaba a dar una salida del flujo de la ciénaga hacia el mar Caribe.

En la Figura 45 se observa como los AAC alcanzan a abarcar aproximadamente la mitad de la Ciénaga Mallorquín, en gran parte por la descarga del Arroyo León, la cual para esta la época de lluvias presenta un mayor caudal aportante en comparación con la época de secas. Aun cuando no se presentan velocidades apreciables dentro del sistema lagunar, por lo que los caudales de los AAC no influyen o alteran la hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín en general, hacia la zona de la boca se observan movimientos de masas de agua que hasta el segundo día de simulación se mantiene constante, luego desciende hasta estabilizarse con las velocidades registradas en las demás series de tiempo.

7.3.5. Simulación hidrodinámica del viento

Para esta simulación se tuvo al viento como único forzante, siguiendo la misma línea de las simulaciones anteriores, de esta forma se describe la influencia del viento en la dinámica de circulación de la Ciénaga Mallorquín, para la época de lluvias. En la Figura 47 se observa como el viento tiene una incidencia en el desplazamiento de las masas de agua en la ciénaga, presentando las mayores velocidades en la zona de la “boca” y hacia las orillas, sin dejar presentarse velocidades considerables a través de toda la Ciénaga Mallorquín.

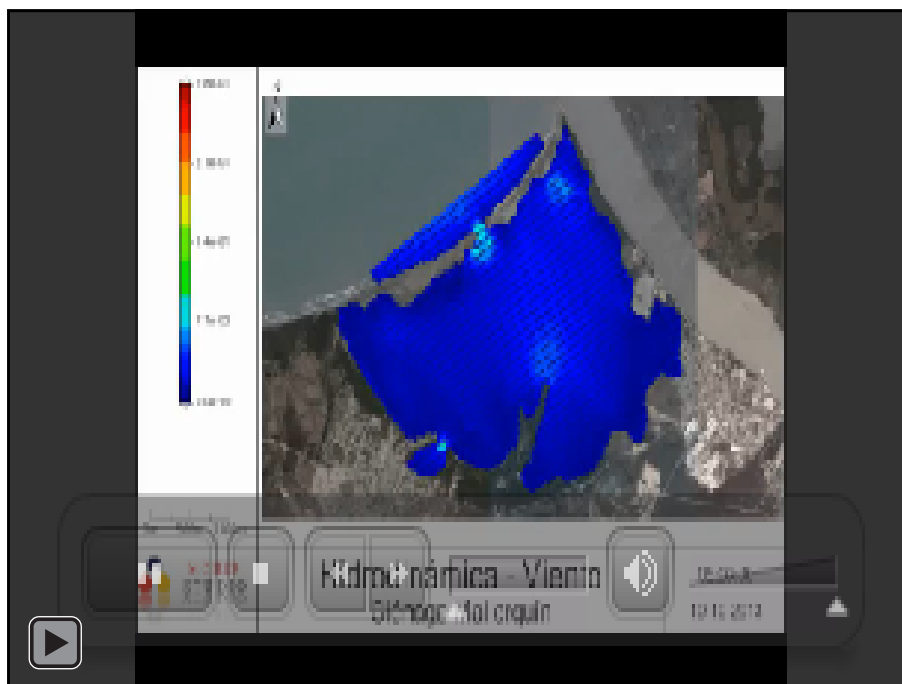


Figura 47. Campo de velocidades integradas en profundidad para la simulación hidrodinámica forzada por el viento, en el periodo de simulación de 10 Oct/13 – 14 Oct/13.

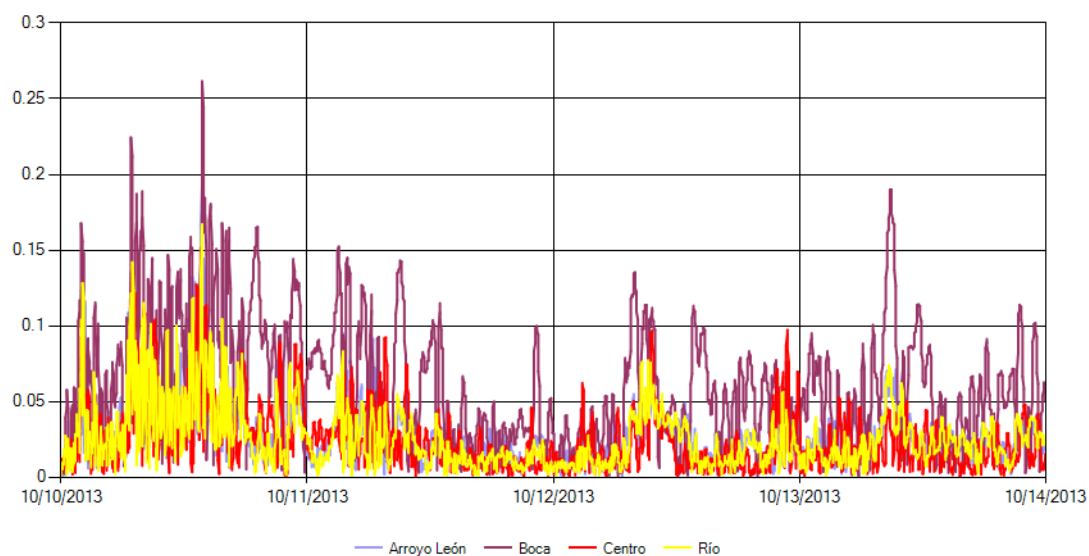


Figura 48. Series de tiempo. Velocidades (m/s).

7.3.6. Simulación del transporte y comportamiento de la Salinidad, temperatura y OD

7.3.6.1. Simulación de la salinidad

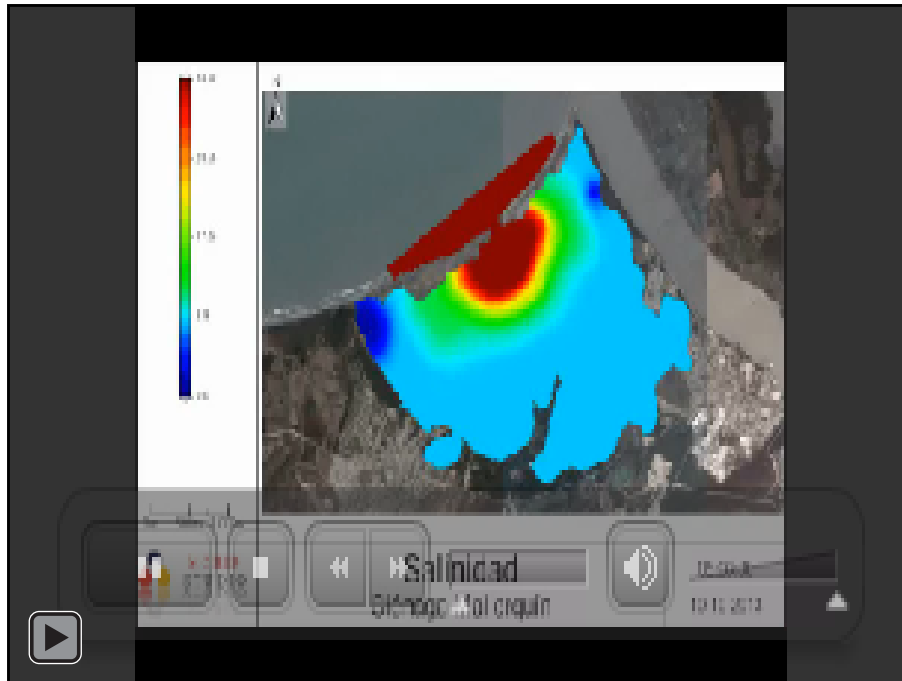


Figura 49. Salinidad simulada en época de lluvias (Período de simulación 10 Oct /13 – 14 Oct /13)

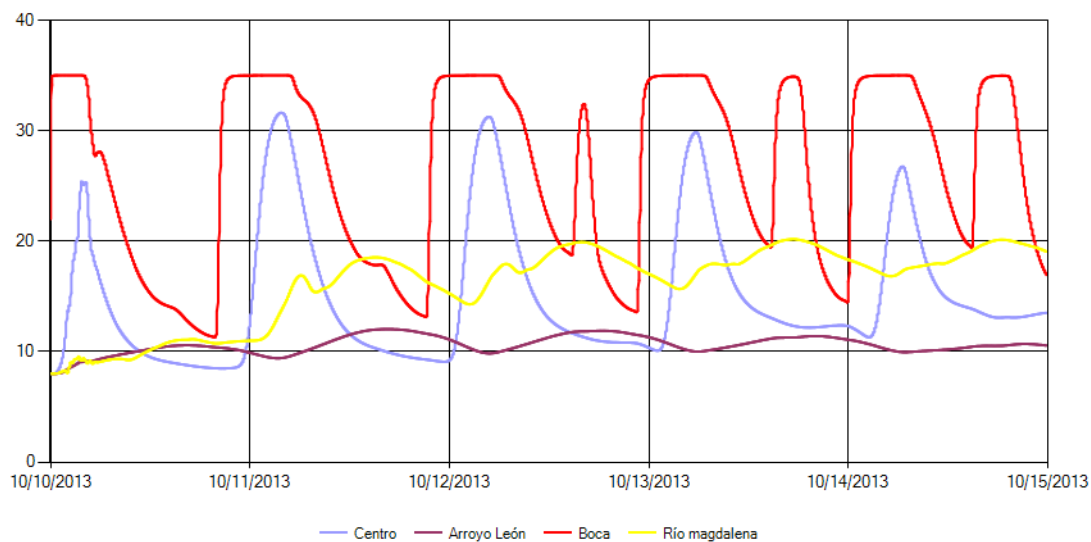


Figura 50. Series de tiempo, salinidad (UPS)

En esta simulación (Figura 49) se muestra como un frente salino entra a la ciénaga con cada momento de flujo del mar hacia la ciénaga, siendo su transporte dentro de la ciénaga dominado por la difusión. Para esta época la salinidad en la medida en que se difunde e interactúa con el aporte de caudal por parte del arroyo León y del río Magdalena, aumenta con cada subida de la marea, por lo que en la Ciénaga Mallorquín la acción de la marea es el principal motor dominante de los niveles de la salinidad. Se destaca la importancia del agua salina para la existencia del mangle, característico de la Ciénaga Mallorquín, sin embargo si tenemos en cuenta que la barra de arena que separa a la ciénaga del mar temporalmente, no es estable permitiendo que las conexiones se presenten de diversas formas y no establemente, encontraremos que la salinidad dentro de la ciénaga en general no responderá a un patrón establecido, por el contrario variara de acuerdo con el tipo de conexión que se pueda llegar a dar.

7.3.6.2. Simulación de la temperatura

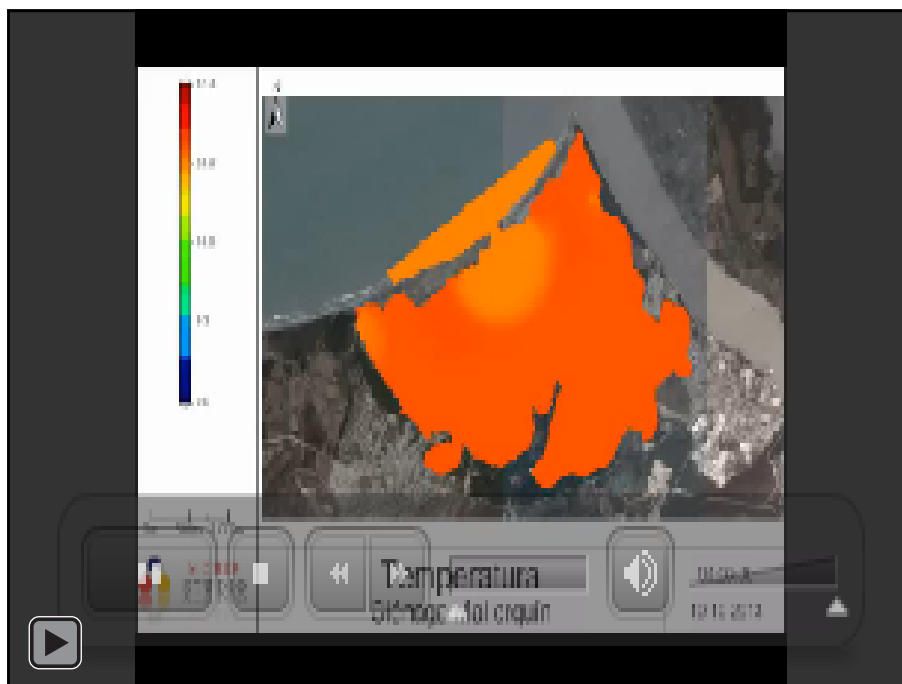


Figura 51. Temperatura simulada en época de lluvias (Período de simulación 10 Oct /13 – 14 Oct /13)

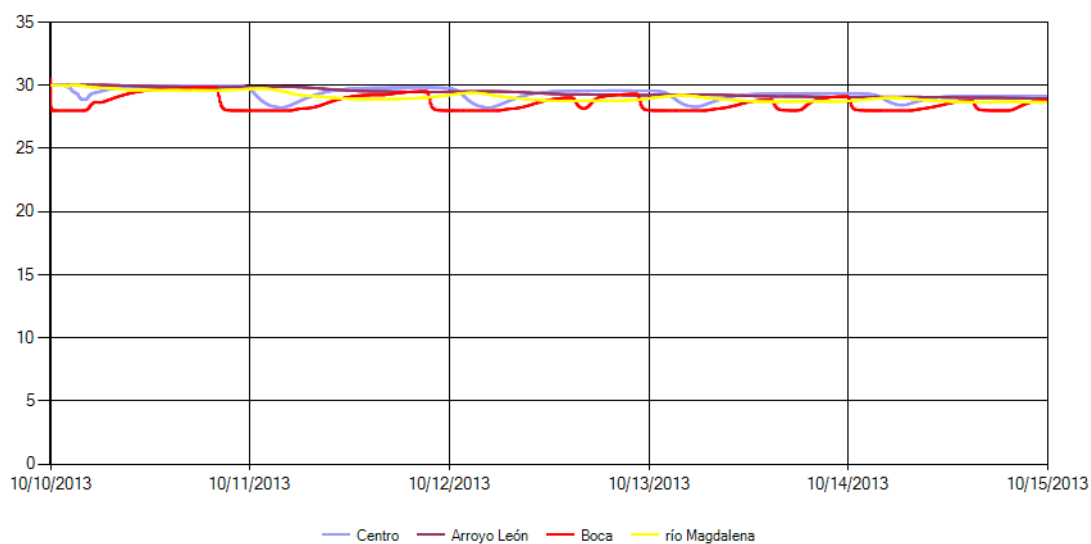


Figura 52. Series de tiempo, temperatura (C°).

La simulación de la temperatura (Figura 51) del agua para esta época climática está regulada por el accionar de las mareas y el aporte del arroyo León, dentro de

la ciénaga las temperaturas rondan los 30°C, aproximadamente dos grados más de los establecidos para los AAC, con lo cual las temperaturas constantemente están equilibrándose con cada proceso de flujo y reflujo de la marea y con la descarga del arroyo León. Esto a su vez favorece el estado térmico de la ciénaga y a todos los procesos que se ven afectados por la temperatura, dado que altos valores representarían dificultades en el desarrollo de los procesos biogeoquímicos que se dan en la Ciénaga Mallorquín.

7.3.6.3. Simulación del oxígeno disuelto

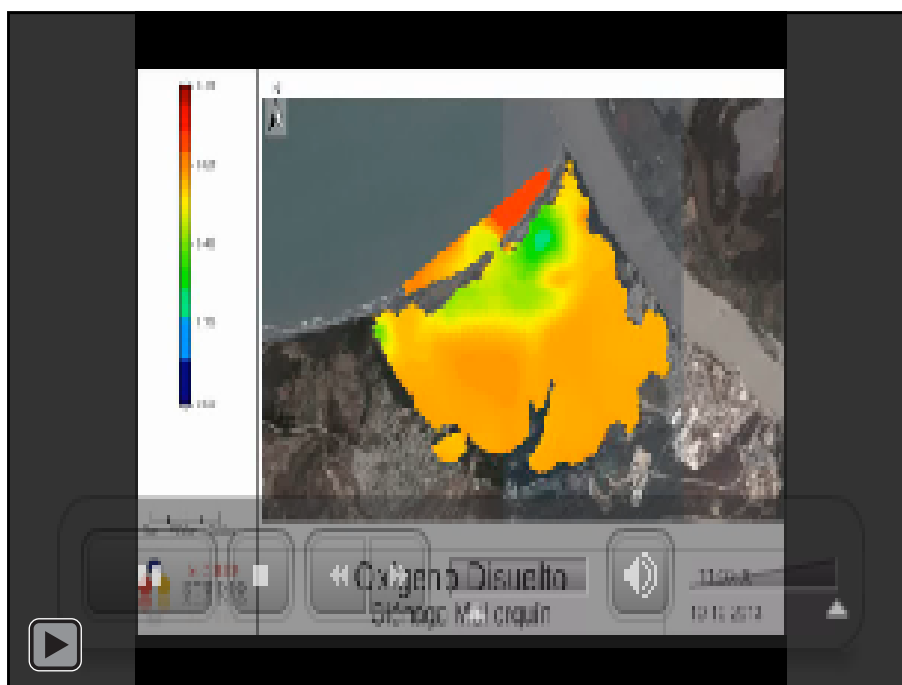


Figura 53. OD simulado en época de lluvias (Período de simulación 10 Oct /13 – 14 Oct /13)

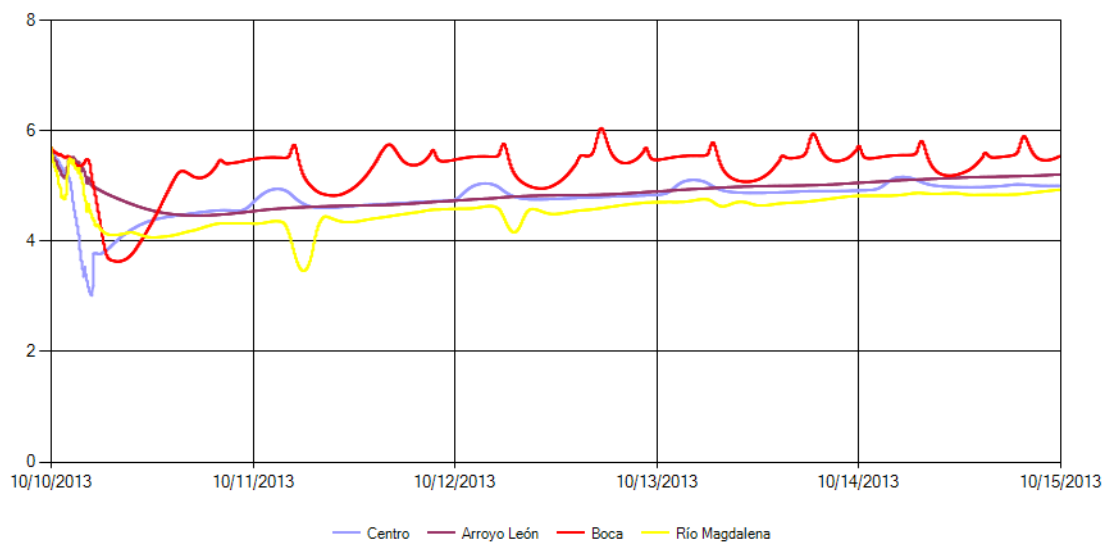


Figura 54. Series de tiempo, oxígeno disuelto (mg/l).

Se tiene en cuenta que el OD influye en la gran mayoría de los procesos biogeoquímicos que se dan en los cuerpos de agua y a su vez hay diferentes factores que afectan los niveles del OD. En la Ciénaga Mallorquín el OD se ve afectado principalmente por los procesos de eutrofización que en ella se dan, los vertimientos no puntuales de aguas residuales, las descargas de aguas residuales que llegan por medio del arroyo León y por los sedimentos en la ciénaga, que de igual forma requieren de oxígeno dentro de sus ciclos, entre otros factores. Si bien los factores anteriormente mencionados no hacen parte del presente estudio, si se han tenido en cuenta aspectos de los que se posee información, como la demanda biológica de oxígeno (DBO), nitratos, nitritos y la temperatura. La simulación (Figura 53) muestra que los niveles de OD son estables a lo largo de la ciénaga, siendo en la entrada o boca que conecta al mar con la ciénaga, el lugar donde al principio hay un leve disminución del OD y luego se estabiliza manteniendo valores acordes con los medidos en campo, la desembocadura del arroyo León es una zona donde de igual forma se dan niveles bajos de OD, los cuales son valores con los que llega el arroyo León a la Ciénaga Mallorquín.

7.1.Comparación de resultados entre la época de lluvias y secas

A continuación se presentará un análisis comparativo de las simulaciones de la hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín, siendo forzada por el viento y AAC por separado, para cada escenario de simulación, con la finalidad de indicar que forzante y en cual escenario se ejerce mayor dominio sobre la dinámica de circulación de la Ciénaga Mallorquín. Para lo anterior se tomó el resultado de las velocidades, dado por la serie de tiempo ubicada en el centro de la laguna costera y se compararon para determinar en cual escenario se presentan mayores velocidades de corriente.

7.1.1. Simulación hidrodinámica: Viento época de secas vs Viento época de lluvias

Como resultado de las simulaciones y las velocidades registradas por la serie de tiempo ubicada en el centro de la ciénaga, y teniendo en cuenta la comparación de dichos resultados como se muestra en la Figura 55, se aprecia que los vientos establecidos para la época de lluvias, ejercen una notable mayor influencia en la hidrodinámica y transporte de la Ciénaga Mallorquín, dado que generan mayores velocidades que en la época de secas, donde se registran velocidades menores.

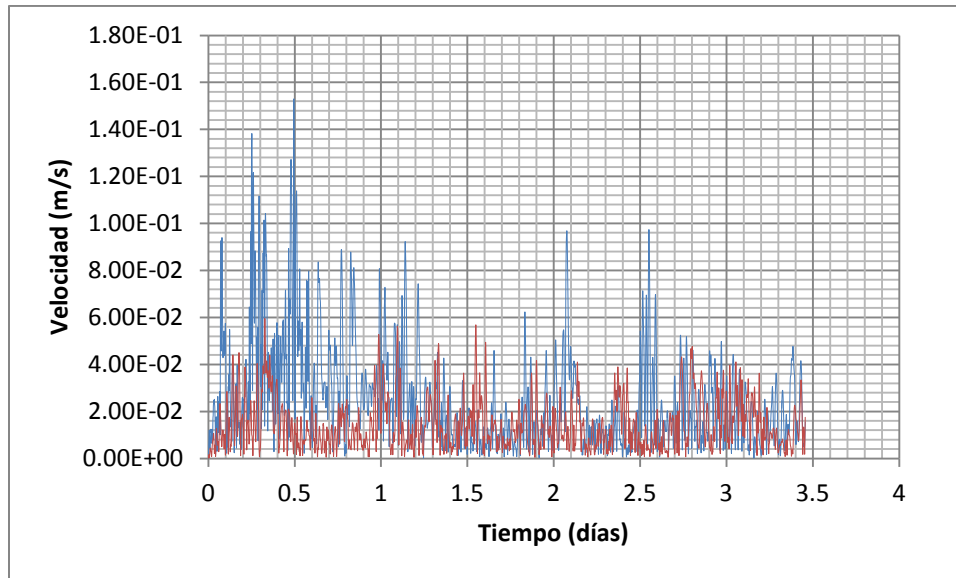


Figura 55. (Azul) Viento época de lluvias, (Rojo) viento época de secas. Comparación de velocidades registradas en la serie de tiempo del centro de la Ciénaga Mallorquín.

7.1.2. Simulación hidrodinámica: AAC época de secas vs AAC época de lluvias

A continuación se procede de la misma forma que en el apartado anterior, a partir de la comparación de los resultados como se muestra en la Figura 56, se establece que los AAC para la época de lluvias son más influyentes en la dinámica de circulación de la Ciénaga Mallorquín. Esto se debe a que en la época de lluvias, se presenta una descarga con mayor caudal proveniente del Arroyo León, en comparación a la época de secas, las cuales presentan caudales muy pequeños, por lo que deriva en una escasa influencia sobre la dinámica de circulación de la Ciénaga Mallorquín.

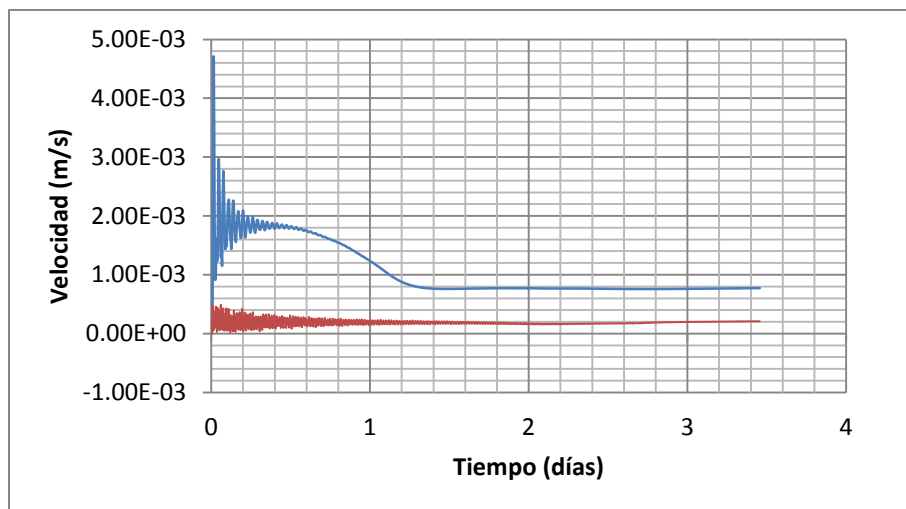


Figura 56. (Azul) AAC época de lluvias, (Rojo) AAC época de secas. Comparación de velocidades registradas en la serie de tiempo del centro de la Ciénaga Mallorquín.

7.2. Escenario hipotético

Los escenarios hipotéticos de desarrollaron con la finalidad de ver como la Ciénaga Mallorquín responde antes alteraciones de origen artificial, al ser el trabajo principalmente un estudio hidrodinámico, se plateo un escenario hipotético 1 en donde la ciénaga ganaría profundidad a partir de trabajos de dragado, lo cual permita establecer si la circulación mejorará con ello.

Este escenario se lleva a cabo teniendo en cuenta todos los parámetros establecidos en las simulaciones de épocas de secas, cambiando únicamente la batimetría, la cual se elaboró por medio de polígonos en Google Earth, a los cuales se les dio valores de profundidades mayores a los de la batimetría original (Figura 57).

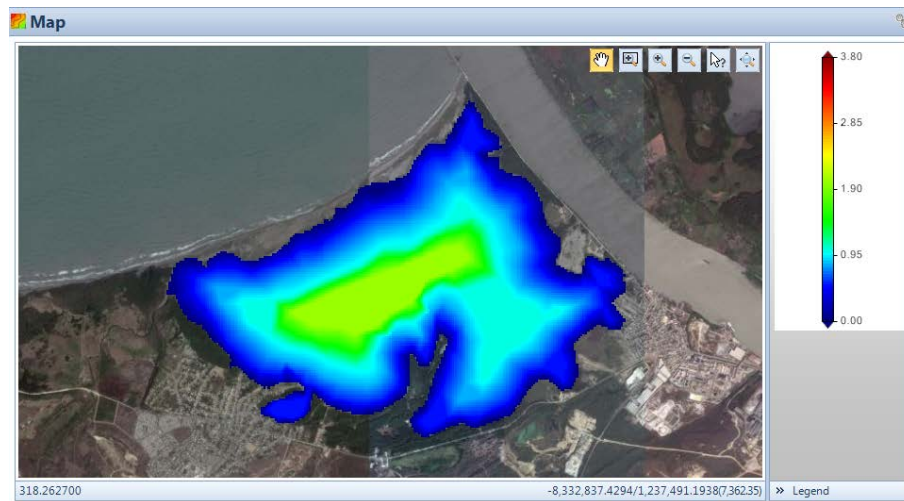


Figura 57. Batimetría para escenario hipotético 1. Profundidad en metros.

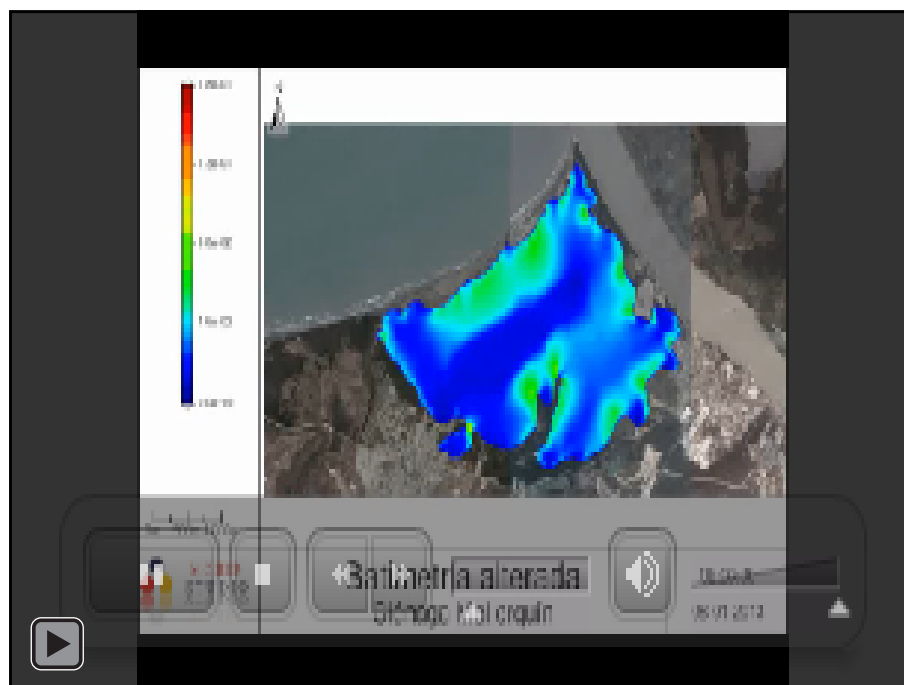


Figura 58. Hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín con una batimetría modificada.

Como resultado de la simulación (Figura 58) y como lo muestra la Figura 59 se observa que con una batimetría más profunda en la ciénaga, la tendencia es a que se generen mayores velocidades, pero apenas con muy poca diferencia que con una la batimetría original. Si bien esta ganancia en la velocidad del agua sería

beneficiosa, lo cierto es que no garantiza mejores condiciones hidrodinámicas y para la calidad del agua en la ciénaga, dado que aparte de la adecuada circulación del agua, en un cuerpo de agua como la Ciénaga Mallorquín es importante que se den renovaciones del agua, proceso que en la ciénaga no se da con facilidad.

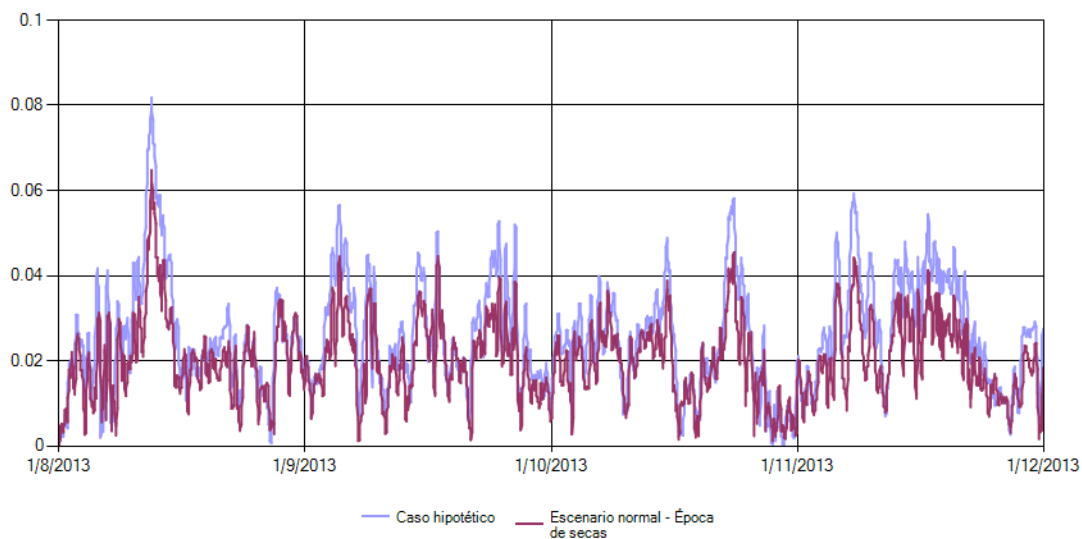


Figura 59. Series de tiempo. Velocidades de corriente (m/s).

8. Conclusiones y recomendaciones

Como resultado del presente trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones divididas en tres partes:

Primera parte:

En la Ciénaga Mallorquín se presentan condiciones morfológicas y ambientales, como una batimetría compleja, velocidades de corrientes bajas, un complejo establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera para el sistema de estudio, entre otros, que derivan en procesos hidrodinámicos y de transporte difíciles de representar, lo mayor realista posible. Por lo que fue importante la implementación de un modelo hidrodinámico y de transporte robusto como el MOHID Studio.

El MOHID Studio ha demostrado capacidad para adaptarse a las condiciones presentadas en la Ciénaga Mallorquín, por lo que se comprueba su bondad para simular diferentes tipos de procesos en lagunas costeras y estuarios. Permitiendo adaptar al modelo más acorde con la realidad y por tanto realizar simulaciones de forma más amigable, sin dejar de presentar requerimientos en cuanto al conocimiento de estas herramientas científicas para su puesta en marcha.

Segunda parte:

Para el escenario de época de secas la forzante más importante e influyente son las condiciones meteorológicas resumidas en el viento de la zona de estudio, dado que la circulación y los procesos de transporte se ven dominados por la dirección en que sopla el viento. Los AAC debido a su caudal aportante no son apreciables dentro de la circulación de la Ciénaga Mallorquín.

En el escenario de época de lluvias, el viento mantiene la influencia en la dinámica de circulación en la ciénaga, los procesos de flujo y reflujo como efecto de la

interacción de la marea con la ciénaga son importantes en la entrada o “boca” y en las zonas próximas a la misma, dado que en esta zona es donde se presentan las mayores velocidades del sistema. Sin embargo en la simulación de la marea como única forzante, se comprobó que la marea no alcanza a tener una influencia apreciable en la dinámica de circulación de la ciénaga, presentando velocidades muy bajas hacia las zonas que comprenden el centro de la ciénaga hacia la parte colindante con las comunidades.

En esta época del año, el Arroyo León aumenta su caudal aportante y en consecuencia influencia, por lo que transporta la escorrentía recogida a lo largo de su trayecto por causa de la época invernal. Se concluye que la marea como única forzante, no es el fenómeno físico que más incidencia tiene en la hidrodinámica de la Ciénaga Mallorquín, siendo el viento la principal forzante generadora de circulación en la ciénaga.

Tercera parte:

Como resultado del comportamiento hidrodinámico de la Ciénaga Mallorquín den e los procesos de transporte de la salinidad, temperatura y OD se concluye lo siguiente:

Para el escenario de época de secas la evolución de la salinidad y la temperatura están dominadas por el transporte difusivo, debido a las bajas velocidades que se dan en la ciénaga en este escenario de simulación. El OD de igual forma se ve dominado por los procesos difusivos, el estado de la calidad del agua de la Ciénaga Mallorquín, a partir del análisis del OD para los días de simulación, no se ve afectada dado que se mantiene por encima de 4,0 mg/L, valor mínimo que se necesita para este tipo de cuerpos de aguas, dado los servicios ambientales que presta.

En el escenario de época de lluvias la salinidad, temperatura y el OD en la ciénaga Mallorquín, está dominada por el transporte difusivo, sin embargo los niveles de la primera están sujetos a la conexión o no con el mar Caribe, por lo que se tiene en cuenta que la marea aporta altos niveles de salinidad al cuerpo de agua. El Arroyo

León aporta un considerable caudal para el intercambio entre aguas continentales y oceánicas por parte del mar Caribe.

8.1.Recomendaciones

8.1.1. Disponibilidad de datos

La modelación ambiental ha probado ser una herramienta eficaz, al momento de realizar diagnósticos y caracterizaciones de los estados de cuerpos de aguas, a los cuales se les estudia por medio de estas herramientas científicas. Al momento de llevar a cabo este tipo de trabajos se comprende y se siente la necesidad de contar con datos y mediciones propias de los cuerpos de agua objetos de estudio. La Ciénaga Mallorquín es considerada por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible como un ecosistema estratégico, y por su importancia como recurso hídrico requiere de acciones y planes para su recuperación y garantizar su preservación. Sin embargo, al no contar con información, entre otras, como niveles del agua u otros aspectos hidrológicos de la ciénaga, generan dificultades para el desarrollo de trabajos de investigación, en pro de generar conocimiento libre que permita tomar decisiones basadas en hechos y soporte científicos. En definitiva, partiendo del desconocimiento resulta muy difícil e impreciso, el planteamiento de acciones sobre este cuerpo de agua estratégico, por lo que se recomienda generar bases de datos a partir de un punto(s) de monitoreo sobre la Ciénaga Mallorquín.

8.1.2. Mejoramiento del hidrosistema

Con base en las simulaciones se puede notar la presencia de zonas en donde se dan velocidades de corrientes muy bajas, por lo que es importante recuperar o mejorar los procesos de circulación en la Ciénaga Mallorquín, a partir de esto el

hidrosistema mejorará en otros aspectos como en la recirculación y reaeración. Parte de esto no solo se logrará con trabajos de dragados, si bien se comprobó que con una batimetría con mayor profundidad las velocidades aumentan, este aumento es mínimo, por lo que se debe buscar otras alternativas que mejoren la circulación en la ciénaga. El aumento de caudal aportante de agua dulce proveniente del río Magdalena resultaría importante para este fin, pero no puede hacerse indistintamente del conocimiento de los procesos biogeoquímicos que dan lugar en la ciénaga, se debe tener información de cuál es el balance ideal de agua dulce con agua salina, de tal forma que no se vean afectados las especies que se asientan en la ciénaga.

La Ciénaga Mallorquín requiere de estudios más completos que involucren todos los parámetros de calidad del agua e hidrosedimentológico a fin de establecer las pautas para trabajos de dragado y mantenimiento de la calidad del agua y de una batimetría óptima.

Se recomienda gestionar planes de desarrollo social, encaminados a mejorar las condiciones sociales de las zonas adyacentes a la Ciénaga Mallorquín, con el fin de darle una mayor y mejor utilidad a la Ciénaga Mallorquín, mejorando sus condiciones del contorno.

8.1.3. Ciénaga Mallorquín – Actualidad y futuro

Hoy en día la Ciénaga Mallorquín ha sido objeto de importantes inversiones económicas por parte de las autoridades ambientales, en miras de recuperar su vitalidad funcionalidad como recurso hídrico, principalmente en aspectos ambientales (<http://www.crautonomia.gov.co/index.php/noticiascra/820>). Sin embargo los problemas que históricamente han afectado a la ciénaga siguen estando presentes, más allá de recientes acciones para recuperarla. La Ciénaga Mallorquín sigue siendo parte del olvido de las entidades gubernamentales y de la misma sociedad. Son numerosas las noticias que surgen de la Ciénaga

Mallorquín, de cómo poco a poco está siendo consumada por las malas prácticas y por el desinterés en general, hasta los trabajos de dragado, pasando por la construcción por parte de la CRA, de tres canales o “Box Couvert”, para aportarle agua proveniente del río Magdalena. El olvido o desinterés al cual ha estado sometida la ciénaga, radica entre otras cosas que gran parte de la sociedad barranquillera desconoce la existencia de este cuerpo de agua. Lo anterior hace que sea necesaria la creación de una cultura, direccionada hacia el conocimiento y sentido de pertenencia de todos los atributos (en este caso naturales) de nuestra región Caribe.

En lo que corresponde a las actividades ingenieriles sobre la Ciénaga Mallorquín, se asume que los trabajos de dragado y la construcción de los “Box Couvert” han sido realizados con base en estudios de rigor y correctas planeaciones, por lo que es posible esperar mejorías de las condiciones ecológicas del cuerpo de agua.

Un aspecto de los cuales más afecta a la Ciénaga Mallorquín, es el contexto social en el cual se encuentra inmersa, si bien es cierto que en la presente tesis solo se plantea un trabajo ingenieril referente al estudio de la dinámica física de la ciénaga, es necesario resaltar las dificultades sociales de las poblaciones localizadas en el entorno de la ciénaga. No se puede esperar que las condiciones ambientales de la ciénaga mejoren, si no se activan medidas para mejorar la calidad de vida de las personas que viven en dichas zonas. Se tiene en cuenta que esperar lo último conllevará un determinado tiempo, de igual forma no se debe declinar en la gestión de mejoras para todo el sector en general, dado que al mejorar el contexto social que envuelve a la Ciénaga Mallorquín, de la misma forma las acciones que se realicen para recuperar sus condiciones ambientales perdurarán en el tiempo, claro está, en la medida en que se establezcan planes para su preservación y adecuado aprovechamiento de sus recursos ambientales.

Estos cuerpos de agua como la Ciénaga Mallorquín, deben ser vistos como oportunidades de desarrollo social y crecimiento cultural, dejando de lado el sentido del oportunismo y desinterés. A nivel mundial, en países vanguardistas en cultura ecológica, esta clase de hidrosistemas, hacen parte de una política

encaminada hacia estilos de vida más sostenibles y responsables con el entorno, del cual en definitiva todos hacemos parte. De tal manera es necesario cambiar la mentalidad que se tiene sobre nuestros recursos hídricos y poder valorar en mayor medida la existencia de los mismos, porque como se ha mencionado, son fuentes de oportunidades para una mejor calidad de vida, tanto de las zonas aledañas a ellos, como a la región en sí, por ser considerados como ecosistemas estratégicos y fuentes de desarrollo.

Como se ha mencionado, se construyeron tres “Box couvert”, con el objetivo de mejorar y aumentar el aporte de agua del río Magdalena hacia la Ciénaga Mallorquín. Estas obras han sido terminadas y puesta en funcionamiento para Enero del presente año 2015, por lo que no hicieron parte de los objetivos de estudios de esta tesis, no obstante, sería interesante para futuros trabajos, por medio de una metodología similar a la llevada a cabo en esta tesis, poder evaluar el impacto que ha tenido la construcción de los Box couvert, sobre la hidrodinámica y calidad de agua de la Ciénaga Mallorquín, si en definitiva se mejoraron las condiciones ambientales de la ciénaga o por el contrario las intervenciones realizadas han sido poco efectivas.

Referencias

- Abbott, M.B., A. Damsgaard and G.S. Rodenhuis, 1973. System 21, Jupiter, a design system for two-dimensional nearly-horizontal flows. J. Hyd. Res., 1, p. 1-28.
- Arakawa, A. & V.R. Lamb, 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA General Circulation Model. Methods of Computational Physics, 17, p.174-264.
- Banderas, TA., 1994. Impacto ambiental de los desarrollos hidroagrícolas sobre las lagunas costeras del Noroeste Mexicano. En: De la Lanza y Cáceres (Eds.). Lagunas costeras y el litoral mexicano. UABCS. Pp. 471 – 492.
- Barrios P., Ramírez L., H. Dinámica y contaminación de lagunas costeras y estuarios. En su: Dinámica ambiental de ecosistemas acuáticos costeros Elementos y ejemplos prácticos de diagnóstico. Primera edición, México, Instituto Politécnico Nacional, 2012. pp. 97 – 138.
- Braunschweig, F., Chambel, P., Fernandes, L., Pina, P. & R. Neves 2004. The object-oriented design of the integrated modelling system MOHID, Computational Methods in Water Resources International Conference, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- Bern, M. and Eppstei., D. Mesh generation and optimal triangulation. Available: <http://www.ics.uci.edu/~eppstein/pubs/BerEpp-CEG-95.pdf>
- Cancino L. y Neves R. Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems. Part II: Application to the Western Scheldt and Gironde estuaries, Journal of Marine Systems 22, 117-131, 1999.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH DIMAR. Caracterización y diagnóstico integral de la zona costera comprendida entre Galerazamba y Bahía Barbacoas – Tomo II Caracterización. Convenio CIOH – CARDIQUE. Cartagena, Colombia. 1998.

- Cicin-Sain, B., V. Vandeweerd, P.A. Bernal, L.C. Williams and M.C. Balgos. 2006. Meeting the Commitments on Oceans, Coasts, and Small Island Developing Status Made at the 2002 World Summit on Sustainable Development: How Well Are We Doing?. The Global Forum on Oceans, Coasts and Islands Co-Chairs' Report—Volume 1. Third Global Conference on Oceans, Coasts, and Islands: Moving the Global Oceans Agenda Forward UNESCO, Paris, January 23-28, 2006. 65 p.
- Conde, D., L. Rodríguez-Gallego y L. Rodríguez. 2002. Análisis conceptual de las interacciones biológicas entre las lagunas y el océano de la costa atlántica uruguaya. Proyecto Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Preservación de Hábitats - FREPLATA [PNUD/GEF/RLA99/G31].
- Coelho, H. S., Neves, R. J.J., White, M., Leitão, P.C. & A. J. Santos. 2002. A model for ocean circulation on the Iberian coast. *Journal of Marine Systems* 32:153- 179.
- CORMAGDALENA – CRA - Universidad del Norte. 1998. Estudio de factibilidad de la recuperación de la Ciénaga de Mallorquín. Inf. Ejecutivo, Corporación Autónoma Regional del Atlántico, Barranquilla, 254 p.
- CRA - Corporación Autónoma Regional del Atlántico y Asociación de Pescadores del Corregimiento La Playa. 2005. Ampliación de la cobertura manglarica a partir de la siembra de 125.000 plántulas producidas en vivero y rehabilitación hídrica mediante la construcción de 2000 m de caños de la ciénaga de mallorquín con participación comunitaria. Proyecto CRA-Asociación de Pescadores del Corregimiento La Playa. 70 p.
- Ecoforest Ltda. 1996. Plan de Manejo Ambiental del Departamento del Atlántico. Cap. 3. 53p.
- Barreto I., Ezzatti P., Fossati M. Estudio inicial del modelo MOHID. Reporte Técnico RT 09-10, Uruguay, Instituto de Computación, Universidad de la República, 2009.
- Torres-Bejarano F., Ramírez L., H., Barrios P., H., Rodríguez C., C. Tendencias actuales en la modelación ambiental. En: Ramírez L., H.,

- Navarro P., J., Barrios P., H. (Eds.). Dinámica ambiental de ecosistemas acuáticos costeros Elementos y ejemplos prácticos de diagnóstico. Primera edición, México, Instituto Politécnico Nacional, 2012. pp. 341 – 370.
- Fennel, W. and T. Neumann 2004 “Introduction to the modeling of marine ecosystems”, Elsevier Oceanographic Series 72, Amsterdam, 297 pp 927.
 - Fletcher, C.A.J., 1991. Computational techniques for fluid dynamics. Volume I. 2nd Edition. Springer Series in Computational Physics Springer-Verlag, 401 pp., New York.
 - Galvis, O., O. Herrera y L. Rodríguez. 1989. Diagnóstico biológico-pesquero de la Ciénaga de Mallorquín. Informe Técnico. Universidad del Atlántico, Barranquilla, 12 p.
 - García, F., Palacio, C., García, U. Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos. Universidad del Magdalena, 2008.
 - Garay, J. A. 1997. Proyecto regional de planificación y manejo de bahías y áreas costeras fuertemente contaminadas del Mar Caribe. Estudio de caso: Bahía de Cartagena. CIOH, Informe Final Proyecto GEF/RLA/93/G41. Cartagena, 300 p.
 - Garay, J. A. y Castro, L. A. 1990. Avances del programa Caripol Colombia. 1985-1990. Memorias VII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar, CCO, Bogotá: 724-733.
 - Gutiérrez, E. 1986. Evaluación ambiental preliminar lagunas costeras Mallorquín y Puerto Colombia. Cartagena. Pág. 1-4.
 - Hesselberg Th. and H.U. Sverdrup, 1914. Die stabilitätsverhältnisse des seewassers bei vertikalen verschiebungen, Bergens Museums Aarbok # 14, Berlin, 17 p.
 - Hidroestudios & Concep. Evaluación ambiental de las microcuencas de los arroyos Grande y León. Corporación Autónoma Regional del Atlántico CRA. Barranquilla, 1998.

- Hirsch, C, 1988. Numerical computation of internal and external flows. Vol. I: Fundamentals of numerical discretization. Wiley Series in Numerical Methods in Engineering. John Wiley & Sons, 515 pp., Chichester.
- IDEAM. Estudio sobre la Determinación de las Componentes Armónicas de la Marea y Descripción de su Comportamiento en Diferentes Puntos de las Costas Colombianas. METEO/003. Bogotá. 2010.
- IDEAM. Pronóstico de Pleamares y Bajamares Costa Caribe Colombiana 2014.
- IGAC. Atlántico. Características geográficas Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá. 1994.
- INVEMAR - Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. 2002. Informe del estado de los ambientes marinos en Colombia: Año 2002 (eds). Medellín: Servigráficas, 2002. 178 p. (Serie de Publicaciones Periódicas No. 8).
- INVEMAR, Ordenamiento Ambiental de la Zona Costera del Departamento del Atlántico, 2007.
- INVEMAR 1996. Memorias primer taller. Programa de monitoreo de la contaminación en la Costa Caribe y Océano Pacífico de Colombia. Santa Marta, 26-28 de Agosto 1996. Santa Marta.
- Informe final CRA, 2012. Caracterización fisicoquímica de los vertimientos de aguas residuales hacia los cuerpos de agua del departamento del atlántico y monitoreo fisicoquímico, microbiológico e hidrobiológico sobre la calidad de las fuentes hídricas.
- Lankford R.R., 1976. Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification, in: Estuarine Processes, Volume II, M. Wiley (editor), Academic Press, New York, N.Y., 182-215.
- Hirsch, C, 1988. Numerical computation of internal and external flows. Vol. I: Fundamentals of numerical discretization. Wiley Series in Numerical Methods in Engineering. John Wiley & Sons, 515 pp., Chichester.
- Instituto Nacional de Hidráulica, modelos matemáticos hidrodinámicos de calidad de aguas, Chile, 2010.

- Koutitas, C. 1988. Density currents-stratified flows. Mathematical models in Coastal engineering: 89-104. London: Pentech Press.
- Leendertsee, J.J., 1967. Aspects of a computational model for long water wave propagation. Rand Corporation, Memorandum RH-5299-RR, Santa Monica.
- Leitão, P., 2003. "Integração de Escalas e Processos na Modelação do Ambiente Marinho", Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Lonin S. 2002. Un modelo morfodinámico para la zona costera del Caribe Colombiano. CIOH, 20:7-17. Cartagena de Indias.
- Cárdenas S. Modelación Hidrodinámica de la laguna costera El Colorado, AHOME, SINALOA. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Sinaloa. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2007.
- Tejera M. y Vásquez M. Modelación de la calidad del agua del río Magdalena, tramo puente Pumarejo-bocas de ceniza. Tesis. Barranquilla, Colombia. Universidad de la Costa, Facultad de ciencias ambientales, 2013.
- POMCA (Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de la Ciénaga de Mallorquín). Programa Cooperativo Interinstitucional Para el Ordenamiento, Manejo y Administración de la Cuenca Hidrográfica de la Ciénaga de Mallorquín, Barranquilla.
- PNUMA. 1999a. Diagnostico regional sobre las actividades y fuentes terrestres de contaminación que afectan los ambientes marinos, costeros y dulceacuícolas en el Pacífico Sudeste. Informes y Estudios del Programa de Mares Regionales del PNUMA 169.
- Pritchard D.W., 1967. What is an estuary?: physical viewpoint, in: Estuaries, G.S. Lauff (editor), American Association for the Advancement of Science, Pub. # 3, Washington, D.C., 3-5.
- Pinho, P., Augusto, S., Branquinho, C., Bio, A., Pereira, M.J., Soares, A. and Catarino, F. (2004) Mapping lichen diversity as a first step for air quality assessment. Journal of Atmospheric Chemistry 49: 377-389.

- Vaz, N. Dias, J.M., Leitão, P.C. and Nolasco, R., 2007. Application of the Mohid-2D model to a mesotidal temperate coastal lagoon. *Computers & Geosciences*, 28, 1204-1209.
- Vaz, N., Dias, J.M. and Leitão, P.C., 2009. Three-dimensional modelling of a tidal channel: the Espinheiro Channel (Portugal). *Continental Shelf Research*. 29, 29-41. doi:10.1016/j.csr.2007.12.005.
- Marín, B. y Garay J. A. 2000. Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras. Proyecto BID-FONAM. Santa Marta.
- Margalef, R. (1969), Comunidades planctónicas en lagunas litorales, En: Ayala, C. A., y Plegjer, F. B. (eds). *Lagunas Costeras Un Simposio*. Mem. Simposi Internacional de Lagunas Costeras, UNAM-UNESCO, 28-30 de noviembre, México, D. F. pp 545-563.
- Martins, F., P. C. Leitão, A. Silva & R. Neves. 2001. 3D modelling of the Sado Estuary using a new generic vertical discretization approach, *Oceanologica Acta*, 24 (1), 51-62.
- Miranda, L. B., Castro, B. M., Kjerfve, B. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2002.
- Sámano, M (2011). Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad del agua en un sistema de información geográfica. Tesis doctoral Universidad de Cantabria.
- Salvador F. Farreras. (2004). *Hidrodinámica de Lagunas Costeras* - Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México.
- Sociedad Portuaria Bocas de Ceniza. 1998. Estudio impacto ambiental del puerto de aguas profundas de Bocas de Ceniza. Barranquilla, Tomos 3 y 4, 455 p. y sin paginar.
- Steer, R., F. Arias-Isaza, A. Ramos, P. Sierra-Correa, D. Alonso y P. Ocampo. 1997. Documento base para la elaboración de la —Política Nacional de Ordenamiento Integrado de las Zonas Costeras Colombianas—.

Documento de consultoría para el Ministerio del Medio Ambiente. Serie Publicaciones especiales No.6, 390 p.

- Spurk, J., 1997. Fluid mechanics. Springer-Verlag, Berlin.
- UNESCO (1981a), Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards, UNESCO Technical Papers in Marine Science, 36, Paris.
- UNESCO (1981b), Background papers and supporting data on the International Equation of State of seawater 1980, UNESCO Technical Papers in Marine Science, 38, 192 p.
- Universidad del Norte. 2005. Análisis sobre el manejo integrado del recurso hídrico en la Ciénaga de Mallorquín. Tomo 1 y 2. pp 623.
- Universidad del Norte & INDERENA (1993). Estudio para determinar el comportamiento de la ciénaga de Mallorquín, al recibir el agua procedente del río Magdalena a través del Tajamar Occidental. INDERENA. Barranquilla. 1993.
- Vilorio, G. 1989. La Ciénaga de Mallorquín. Barranquilla, 89 p.
- Wong K.C., 1987. Tidal and subtidal variability in Delaware's inland bays, Journal of Physical Oceanography, 17: 413-422.



CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO

Barranquilla, 06 de Septiembre de 2015

Marque con una X
Tesis ☐ Trabajo de Grado ☒

Yo CESAR TORRES MARCHENA, identificado con C.C. No1.140.834.829, actuando en nombre propio y como autor del trabajo de grado titulado APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MOHID PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE TRANSPORTE DE LA CIÉNAGA MALLORQUÍN, presentado y aprobado en el año 2015 como requisito para optar al título de INGENIERO AMBIENTAL; hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizo a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en un (01) ejemplar, en Barranquilla D.E.I.P., a los 06 días del mes de Septiembre de Dos Mil Quince 2015

EL AUTOR - ESTUDIANTE. Cesar Torres Marchena
FIRMA

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS O TRABAJO DE GRADO: APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO
MOHID PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE TRANSPORTE DE LA CIÉNAGA MALLORQUÍN

AUTOR AUTORES

Apellidos Completos	Nombres Completos
TORRES MARCHENA	CESAR ALEXANDER

DIRECTOR (ES)

Apellidos Completos	Nombres Completos
TORRES BEJARANO	FRANKLIN MANUEL

JURADO (S)

Apellidos Completos	Nombres Completos
OSORIO	CAMILO
HERRERA	ISRAEL HENRIQUE

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero ambiental

FACULTAD: Ciencias Ambientales

PROGRAMA: Pregrado ☒ Especialización _____

NOMBRE DEL PROGRAMA: Ingeniería Ambiental

CIUDAD: Barranquilla AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO: 2015

NÚMERO DE PÁGINAS 131

TIPO DE ILUSTRACIONES:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Ilustraciones | <input type="checkbox"/> Planos |
| <input type="checkbox"/> Láminas | <input type="checkbox"/> Mapas |
| <input type="checkbox"/> Retratos | <input type="checkbox"/> Fotografías |
| <input checked="" type="checkbox"/> Tablas, gráficos y diagramas | |

MATERIAL ANEXO (Video, audio, multimedia o producción electrónica):

Duración del audiovisual: _____ minutos.

Número de casetes de vídeo: _____ Formato: VHS _____ Beta Max _____ ¼ _____ Beta Cam _____ Mini DV _____

DV Cam _____ DVC Pro _____ Vídeo 8 _____ Hi 8 _____

Otro. Cuál? _____

Sistema: Americano NTSC _____ Europeo PAL _____ SECAM _____

Número de casetes de audio: _____

Número de archivos dentro del DVD (En caso de incluirse un DVD diferente al trabajo de grado):

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS: Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. (En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Unidad de Procesos Técnicos de la Unidad de información en el correo biblioteca@cuc.edu.co, donde se les orientará).

ESPAÑOL

INGLÉS

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS:(Máximo 250 palabras-1530 caracteres):